

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Фізичне матеріалознавство»

спеціальності 132 «Матеріалознавство»

**на тему: «Вплив відпалу плівок FePd у вакуумі та атмосфері H_2 на
формування магнітно-твердої фази $L1_0$ »**

Виконав:

студент IV курсу, групи ФМ-61-1

Беседін Ігор Дмитрович

Керівник:

Проф., д.т.н. Макогон Юрій Миколайович

Консультант з питань нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н.А.

Консультант з економічно-організаційної частини:

к.е.н., доцент Нараєвський С.В.

Консультант з охорони праці:

д.т.н., професор Левченко О.Г.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інженерно-фізичний факультет
Кафедра фізики металів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Фізичне матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Бєсєдіна Ігоря Дмитровича

1. Тема роботи «Вплив відпалу плівок FePd у вакуумі та атмосфері H_2 на формування магнітно-твердої фази $L1_0$ », керівник роботи Макогон Юрій Миколайович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «21» травня 2020 р. № 1132-с
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: Літературні дані та результати особистих експериментів.
4. Зміст роботи: перелік умовних позначень, вступ, літературний огляд, матеріали та методика досліджень, експериментальна частина, організаційно-економічна частина, охорона праці, висновки, conclusions, список використаної літератури.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 37 рисунків та презентація.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С. В. доцент		
Охорона праці	Левченко О. Г., професор		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання	28 вересня 2019 року	
2	Проведення та написання літературного огляду	28 вересня 2019 року – 24 жовтня 2019 року	
3	Освоєння методик досліджень	24 жовтня 2019 року – 26 листопада 2019 року	
4	Виконання експериментальних досліджень	26 листопада 2019 року – 7 березня 2019 року	
5	Отримання результатів	7 березня 2019 року – 28 березня 2019 року	
6	Написання висновків	28 березня 2019 року – 7 квітня 2019 року	
7	Оформлення дипломної роботи	7 квітня 2019 року – 27 квітня 2019 року	
8	Оформлення презентації та написання доповіді	27 квітня 2019 року – 4 червня 2019 року	
9	Попередній захист	9 червня 2020 року	
10	Захист на засіданні ЕК	16 червня 2020 року	

Студент

Бесєдін Ігорь

Керівник

Макогон Юрій

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 87 сторінок, 5 таблиць, 37 рисунків, 50 літературних джерел.

ВІДПАЛ У ВОДНІ, ВІДПАЛ У ВАКУУМІ, НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКИ НА ОСНОВІ FePd.

Об'єкт досліджень: Термічно активовані процеси фазоутворення в нанорозмірних плівках FePd(5 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001).

Предмет дослідження: нанорозмірні плівки Fe₅₀Pd₅₀(5 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001).

Мета роботи: дослідження формування фазового складу та структури в нанорозмірних плівках FePd(5 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) при відпалах у вакуумі та атмосфері водню.

Методи дослідження: електроннографічний аналіз фазового складу та структури; електронний парамагнітний резонанс – дослідження магнітних властивостей; атомна силова мікроскопія (АСМ) – дослідження морфології поверхні плівок.

Результати досліджень та їх новизна: отримані нові знання про закономірності фазоутворення в нанорозмірних плівках на основі Fe₅₀Pd₅₀(5 нм) при відпалах у вакуумі та атмосфері водню.

ABSTRACT

Graduate work: 87 pages, 5 table, 37 figures, 50 references.

ANNEALING IN HYDROGEN, ANNEALING IN VACUUM, NANOSCALE FePd BASED FILMS

The object of research: thermally activated phase formation processes in nanoscale FePd films on the $\text{SiO}_2(100\text{ nm})/\text{Si}(001)$ substrates.

The subject of research: nanoscale $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5\text{ nm})$ films on the $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$ substrates.

Purpose of work: study of the phase composition and structure formation in nanosized FePd films (5 nm) on $\text{SiO}_2(100\text{ nm})/\text{Si}(001)$ substrates during annealing in vacuum and hydrogen atmosphere.

Research methods: electrographic analysis of phase composition and structure; electronic paramagnetic resonance research of magnetic properties; atomic force microscopy (AFM) study of the surface morphology of the films.

Research results and novelty: was obtained new knowledge about the regularities of phase formation in nanoscale films based on $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5\text{ nm})$ at annealing in vacuum and hydrogen atmosphere.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Технології магнітного запису	12
1.1.1 Перпендикулярний магнітний запис	13
1.1.2 Термічно активований магнітний запис	15
1.2 Гігантський магнітний опір.....	16
1.3 Взаємодія Pd та Fe із воднем в масивному стані	17
1.4 Формування інтерметалідних фаз у системі FePd	19
1.5 Дифузійні процеси та твердофазні реакції у плівках FePd	21
1.6 Вплив відпалу у атмосфері H_2 на процеси фазоутворення у плівках FePd/Ag	24
1.7 Мета дослідження	29
1.8 Висновки до розділу 1	29
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1 Матеріали дослідження	30
2.2 Магнетронний метод отримання тонких плівок	30
2.3 Термічна обробка в атмосфері водню	32
2.4 Відпал у вакуумі	33
2.5 Методи дослідження	33
2.5.1 Електронографічний аналіз	33
2.5.2 Атомно-силова мікроскопія	35
2.5.3 Метод електронного парамагнітного резонансу	38
2.6 Висновки до розділу 2	41
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	43

3.1 Фазові та структурні перетворення у плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ при відпалах у вакуумі та атмосфері H_2	43
3.1.1 Фазові та структурні перетворення у плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ при відпалах у вакуумі	43
3.1.2 Фазові та структурні перетворення у плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ при відпалах в атмосфері водню	44
3.2 Дослідження зміни морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм)	48
3.2.1 Зміна морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та при відпалі у вакуумі	48
3.2.2 Дослідження зміни морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) при відпалі в атмосфері водню	49
3.3 Дослідження процесу впорядкування в плівці $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) методом ЕПР	51
3.4 Висновки до розділу 3	57
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	59
4.1 Науково-технічна актуальність дипломної роботи (ДР).....	59
4.2 Мета і завдання ДР	60
4.3 Розрахунок планових витрат на проведення ДР	60
4.3.1 Витрати на оплату праці	61
4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску.....	63
4.3.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень	63
4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання	64
4.3.5 Вартість послуг сторонніх організацій	65
4.3.6 Витрати на службові відрядження.....	65
4.3.7 Інші прямі невраховані витрати по темі	65
4.3.8 Накладні витрати	65
4.3.9 Визначення планової коштовної вартості теми	66
4.4 Науково-технічна ефективність	67

	7
4.5 Висновки до розділу 4	70
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	71
5.1 Вступ.....	71
5.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення.....	72
5.2.2 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрації	73
5.2.3 Розрахунок і аналіз освітленості приміщення.....	75
5.2.4 Електробезпека	76
5.2.5 Пожежна безпека	77
5.3 Висновок до розділу 5.....	78
ВИСНОВКИ.....	79
CONCLUSIONS	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОЦК – графєцентрирована кубічна ґратка;

ГЦК – графєцентрирована кубічна ґратка;

ГМО – гігантський магнітний опір;

АСМ – атомно-силова мікроскопія;

ЕПР – електронний парамагнітний резонанс;

НВВ – надвисокочастотне випромінювання;

ДП – дипломна робота;

ФЗП – фонд заробітної плати.

ВСТУП

У наш час будь-яка обчислювальна техніка, наприклад персональний комп'ютер, обов'язково містить накопичувач інформації – запам'ятовуючий пристрій, який може зберігати та накопичувати великий об'єм інформації. Загалом ці носії базуються на магнітному записі. У накопичувачах інформації на рухомому магнітному носії, де основне – це накопичення інформації, важливим параметром є поверхнева інформаційна щільність запису, яка визначається кількістю інформації, що припадає на одиницю площі поверхні робочого шару носія інформації.

Виготовлення сучасних магнітних накопичувачів великої місткості засноване на застосуванні тонкоплівкових матеріалів. Завдяки застосуванню нових магнітних матеріалів і в результаті вдосконалення технології виготовлення всіх тонкоплівкових елементів магнітного накопичувача за відносно короткий термін поверхнева щільність запису інформації збільшилася: у 1998 році вона становила приблизно 12 Гбіт/дюйм², в 2000 р - близько 100 Гбіт/дюйм², а в 2015 році вже перевищила за 1,34 Тбіт/дюйм².

Для відтворення інформації, яка була записана з високою щільністю, застосовується тонкоплівковий елемент, електричний опір якого змінюється в магнітному полі. Такий елемент називають магніторезистивним. Він напильється з високопроникного магнітного матеріалу, наприклад пермалою. Відносна зміна електричного опору пермалоевого елемента в магнітному полі становить близько 2 %. Величина відносної зміни електричного опору, за результатами експериментальних досліджень, може досягати десятки відсотків у багатошарових тонкоплівкових матеріалах та одношарових гранульованих плівках, тому вони отримали назву - матеріали з надгігантським магнітоопором [1].

У наш час є проблема зі збільшенням місткості накопичувальних пристроїв. Для того, щоб підвищити щільність запису та збереження інформації треба зменшувати розмір зерен. Але при зменшенні розміру зерна до певного значення матеріал переходить у суперпарамагнітний стан. Це явище призводить до того, що внаслідок розорієнтування магнітних доменів тепловими коливаннями атомів середовище перестає зберігати інформацію [2].

Явище суперпарамагнетизму являє собою паразитний фактор, який сильно скорочує тривалість часу збереження інформації при зменшенні обсягу частинок, тому стійкість запису неможлива. Також, коли відстань між сусідніми частинками (зернами) дуже мала, на магнітні властивості частинки (зерен) починають впливати ефекти міжзеренної взаємодії. Це приводить до того, що величина енергетичного бар'єру зерен стає залежною від орієнтації магнітних моментів сусідніх зерен, що значно ускладнює розуміння процесів перемагнічування в такому взаємодіючому ансамблі [3].

В даній роботі досліджується вплив відпалу плівки FePd(5 нм) у вакуумі і атмосфері H_2 на формування магнітно-твердої фази $L1_0$.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Залізо – елемент восьмої групи четвертого періоду періодичної системи хімічних елементів, феромагнетик, період ґратки $2,870 \text{ \AA}$. Залізо має три модифікації:

- до $768 \text{ }^{\circ}\text{C}$ парамагнітне $\alpha\text{-Fe}$ з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою (ОЦК);
- при $912 \text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається поліморфне перетворення і залізо переходить з ОЦК в ґранецентровану кубічну ґратку (ГЦК);
- при $1394 \text{ }^{\circ}\text{C}$ утворюється $\delta\text{-Fe}$ з ОЦК [4,5].

Паладій – належить до десятої групи періодичної таблиці хімічних елементів, знаходиться у п'ятому періоді. Має ГЦК решітку, парамагнетик, період ґратки $3,890 \text{ \AA}$ [6].

Плівкові системи FePd – дуже цікаві об'єкти для створення магнітних носіїв інформації з високою щільністю запису завдяки великій енергії магнітокристалічної анізотропії. Аналіз фізичних характеристик багат шарових плівок говорить про те, що паладій в присутності феромагнетика стає теж феромагнетиком. Це пояснюється фактором збільшення ГЦК–ґратки Pd на (5–10) %. Проявляється далекодіюча обмінна взаємодія з іонами Fe, й в результаті чого у атомів Pd з'являється наведений магнітний момент. В неупорядкованому стані фаза FePd має ГЦК – ґратку а в упорядкованому має ГЦТ–ґратку $L1_0$, яка аналогічна інтерметалідним фазам $L1_0 \text{ FePt}$, CoPt та MnPt [7].

1.1 Технології магнітного запису

У магнітних носіях інформації цифровий запис проводиться на магніточутливий матеріал. До таких матеріалів відносяться нікель, кобальт, сплави, деякі різновиди оксидів заліза, магнітопласти, магнітоеластичні, мікропорошкові магнітні матеріали.

Зазвичай магнітне покриття має товщину в кілька мікрометрів. Для отримання магнітних стрічок і гнучких дисків магнітне покриття наносять на немагнітну основу, а для отримання жорстких дисків використовують алюмінієві сплави та композиційні матеріали підкладки. В моєму дослідженні в якості підкладки було використано термічно окиснений монокристал $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}$. Магнітне покриття диска має безліч намагнічених зерен, тобто доменну структуру [8].

Магнітний домен — просторова область, в якій магнітні моменти окремих частинок орієнтовані однаково і досягається максимальне намагнічування. Суміжні магнітні домени відділені один від одного доменними стінками. Розміри доменів можуть досягати 100 мкм.

В зовнішньому магнітному полі відбувається як переорієнтація магнітних моментів окремих доменів, так і зміна розмірів цих доменів за рахунок руху доменних стінок. Це призводить до намагнічення зразка, яке зберігається при зменшенні зовнішнього магнітного поля до нуля [9].

На рис 1.1 наведена схема запису і зчитування з магнітного диску. Двійкова одиниця - це зміна напрямку електрорушійної сили за певний проміжок часу, а нуль – відсутність зміни.

Поверхня магнітного носія розглядається як послідовність точкових позицій, при цьому кожна така послідовна позиція асоціюється з бітом інформації. Для запису заздалегідь наносяться мітки, які допомагають знаходити

позиції запису, тому, що розташування позицій визначається неточно. Для нанесення цих міток робиться роздрібнення диска на доріжки, що називається форматуванням [10].

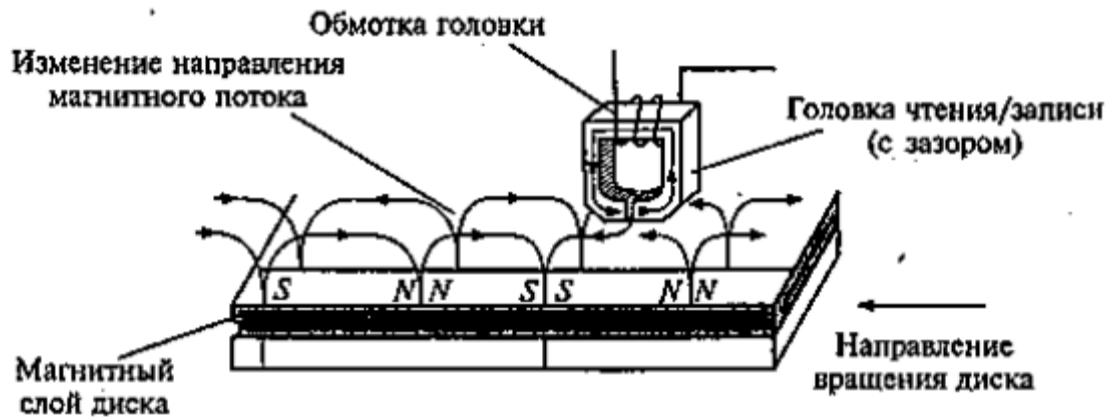


Рисунок 1.1 – Запис та зчитування даних з магнітного диску [10]

Завдяки надання диску швидкого обертання та переміщенню магнітної голівки по радіусу диска можна отримати швидкий доступ до будь-якої частини його поверхні [11].

1.1.1 Перпендикулярний магнітний запис

Довгоочікуваною технологією запису є спосіб перпендикулярного магнітного запису на жорстких дисках, який використовується для стаціонарних комп'ютерів та ноутбуків.

Технологія перпендикулярного запису формується шляхом розташування магнітних частинок під кутом 90° до площини магнітного диску. Це сприяє тому, що домени, які зберігають різні значення, не відштовхуються один від одного, що свідчить про те, що намагнічені частинки повернуті один до одного різними

полюсами. Також збільшення щільності більше не вимагає зменшення товщини шару. Це забезпечує стабільність магнітного матеріалу [12].

При перпендикулярному записі використовується набагато складніша структура магнітного носія. Записуючий шар, який складається із окисненого шару хрому, платини і кобальту, знаходиться прямо під тонким захисним шаром. Підкладка містить 2 антиферомагнітні шари, які знімають внутрішні напруження магнітного поля [13].

На рисунку 1.2 представлено типову схему технології перпендикулярного магнітного запису. При перпендикулярному записі використовується поле, яке генерується між магнітним підшаром та між зрізом полюса головки запису. Завдяки цьому частинки, які входять до складу магнітного шару, намагнічуються вертикально, а магнітного підшару – горизонтально.

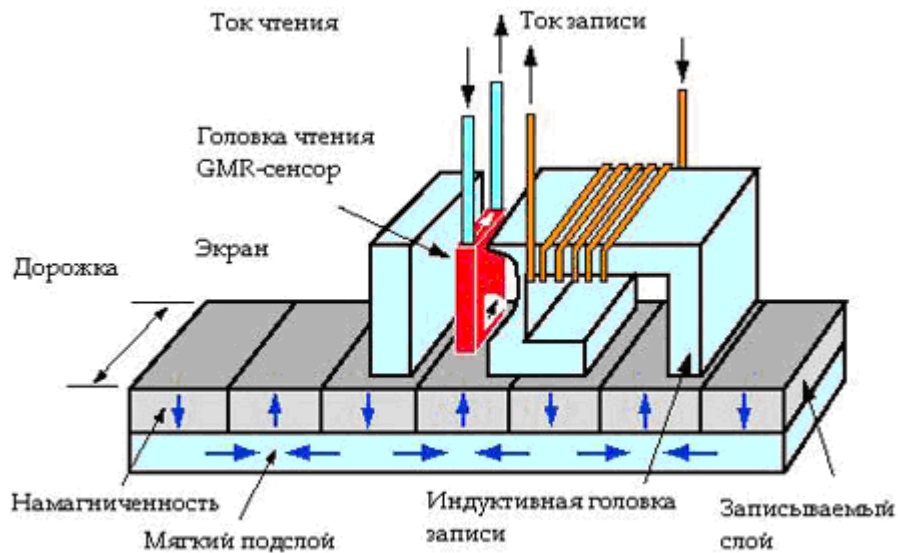


Рисунок 1.2 – Схема технології перпендикулярного магнітного запису [14]

1.1.2 Термічно активований магнітний запис

З рисунку 1.3 можна побачити різницю між перпендикулярним записом та термічно активованим записом, яка полягає в тому, що перед термічно активованим магнітним записом домени піддаються термічній обробці.

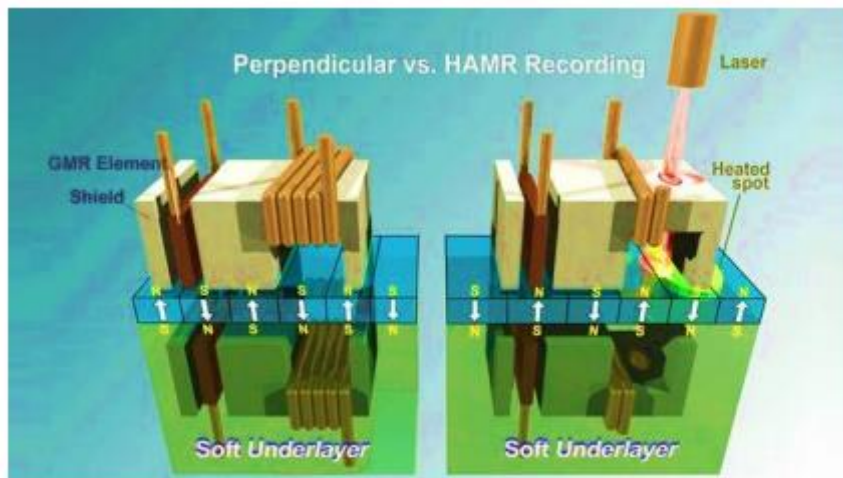


Рисунок 1.3 – Різниця між термічно активованим магнітним записом та перпендикулярним записом [15]

За допомогою дуже точного нагрівання доменів можна забезпечити високу щільність зберігання даних [15].

Енергію термічного бар'єру можна розрахувати за формулою:

$$E_B = K_u V \left(1 - \frac{4\pi M_s}{H_k}\right)^2 \quad (1.1)$$

де E_B – енергія термічного бар'єру, Дж;

K_u – енергія магнітокристалічної анізотропії, Дж/см³;

V – об'єм, см³; M_s – намагніченість насичення, А/м;

H_k – коерцитивна сила, Е [16].

Технологія, за оцінками експертів, дозволяє збільшити щільність запису в 10 разів порівняно з використанням перпендикулярного методу. Також прогнозується, що термічно активований магнітний запис забезпечить швидке зростання щільності запису [17].

1.2 Гігантський магнітний опір

Гігантський магнітний опір (ГМО) — квантово-механічний ефект, що спостерігається у металевих плівках, які складаються з феромагнітних і провідних немагнітних шарів. Ефект полягає у значній зміні електричного опору таких структур при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів. Напрямок намагніченості можна керувати, наприклад, шляхом застосування зовнішнього магнітного поля. В основі ефекту лежить розсіяння електронів, що залежить від напрямку спіну.

Основними сферами застосування ефекту є головки магнітного поля, що використовуються в жорстких дисках, біосенсорах, приладах мікроелектромеханічних систем та інших. Структури з гігантським магнітним опором застосовувались у магніторезистивній оперативній пам'яті, як логічні комірки для зберігання одного біту інформації [18].

Інформація в жорстких дисках кодується за допомогою магнітних доменів, коли логічна одиниця – це один напрям намагніченості, а протилежний напрям намагніченості – логічний нуль. Всього є 2 методи запису: повздовжній та перпендикулярний.

При використанні повздовжнього методу запису домени розташовуються у площині пластин, тобто напрямок в них паралельно поверхні. При цьому між ними завжди створюється перехідна область (доменна стінка). При утворенні

перехідної області на межі двох північних полюсів, поле буде напрямлено назовні, а при утворенні південних полюсів – всередину. У феромагнітному шарі сенсора фіксується намагніченість, яка перпендикулярна до площини пластини диску, а в сенсорному шарі - паралельно до неї для того, щоб зчитати напрямок магнітного поля над доменною структурою. Відхилення намагніченості у сенсорному шарі від рівноважного положення свідчить про зміну напрямку зовнішнього магнітного поля. Взаємна орієнтація доменів, над якими пройшла магнітна головка, визначається наступним чином: при збіганні напрямку відхилення з напрямком у фіксованому шарі – електричний опір сенсора зменшується та навпаки, за різними напрямками спостерігається збільшення опору [19].

1.3 Взаємодія Pd та Fe із воднем в масивному стані

З рисунку 1.4 можна побачити, що водень не утворює хімічних сполук із Fe, зокрема не відбувається формування гідридів. При розчиненні водень знижує температуру плавлення заліза та розширює діапазон стійкості γ -Fe, викликаючи появу газоевтектичної, газоперитектичної та газоевтектоїдної рівноваг.

В системі положення ліній фазових рівноваг помітно змінюється тільки до тиску (20 – 30) МПа. Подальше збільшення тиску практично не впливає на положення ліній фазових перетворень, що пов'язано з від'ємним відхиленням від параболічного закону розчинності при високих температурах та тиску [20, 21].

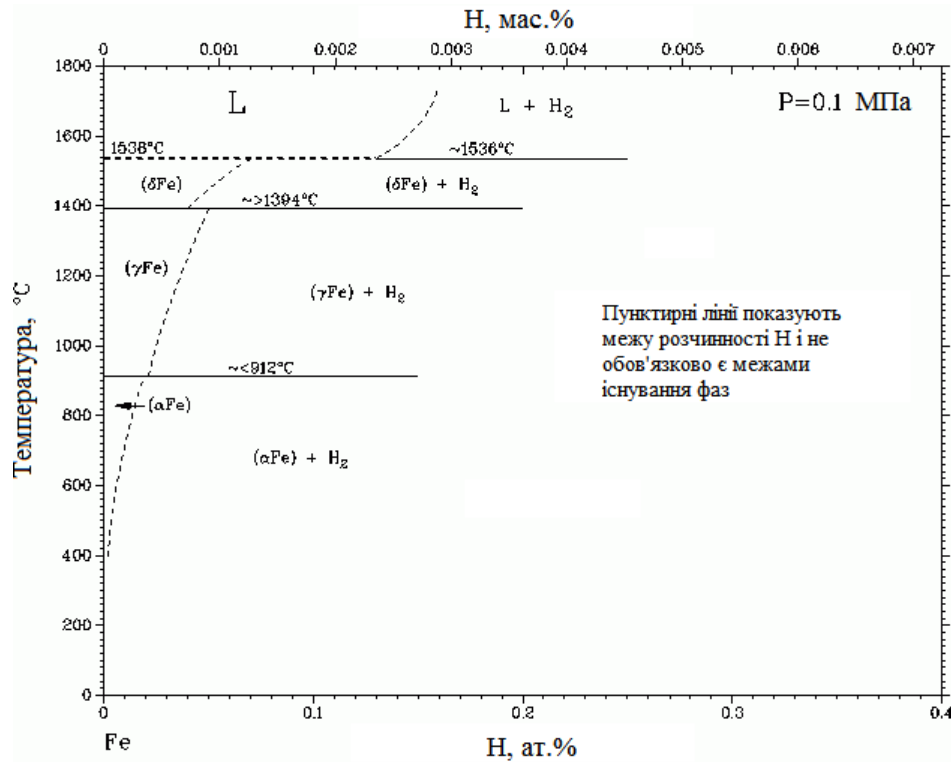


Рисунок 1.4 – Діаграма фазового стану системи Fe-H
при тиску 0,1 МПа [20, 21]

Система Pd-H вивчається вже дуже давно, але на сьогодні повна діаграма ще не побудована. Але, як видно з рис. 1.5 встановлена широка область розшарування за низьких температур. Вже за кімнатної температури паладій дуже активно поглинає водень. Також абсорбція супроводжує утворення фаз α і β , які мають кристалічну ґратку вихідного чистого металу. Саме ця особливість відрізняє Pd серед інших металів. Фаза α має ГЦК структуру з параметрами ґратки, що при зростанні вмісту водню до 4,7 ат.% збільшуються. Фаза β має сильно розупорядковану кубічну структуру з областю гомогенності. При температурі 300 °С, чи при тиску більше 2 МПа, Pd і PdH утворюють неперервний ряд твердих розчинів [22].

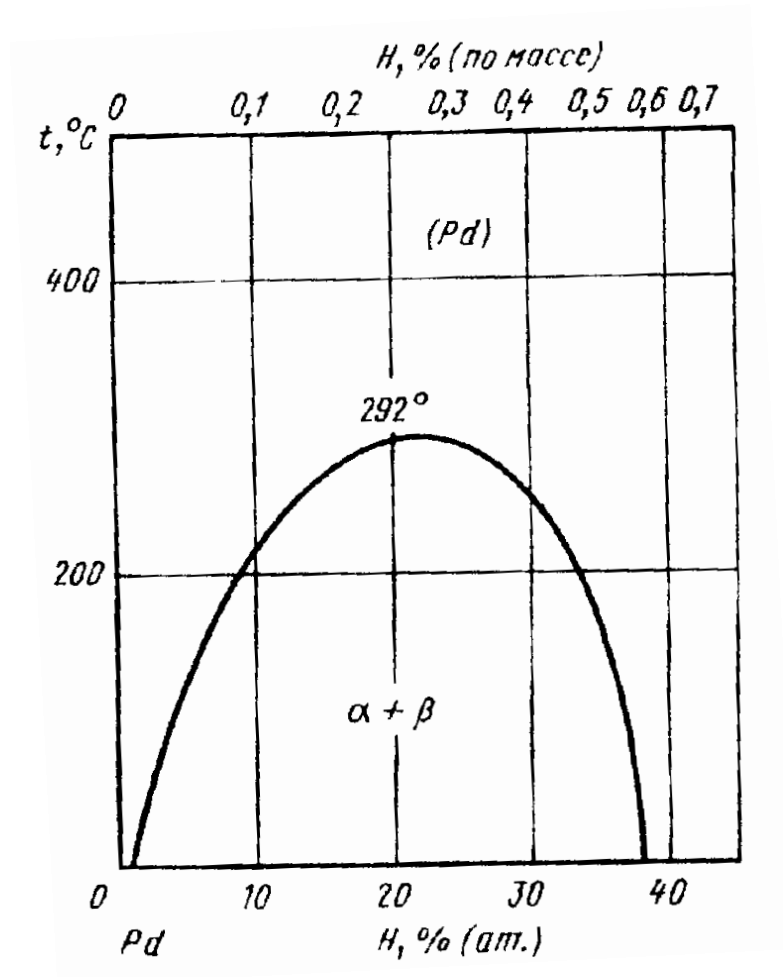


Рисунок 1.5 – Діаграма фазового стану системи Pd-H [22]

1.4 Формування інтерметалідних фаз у системі FePd

В залежності від концентрації елементів в системі FePd можливо формування впорядкованих фаз[8] $L1_0$ (FePd) та $L1_2$ (FePd₃), області існування яких наведено на рис 1.6

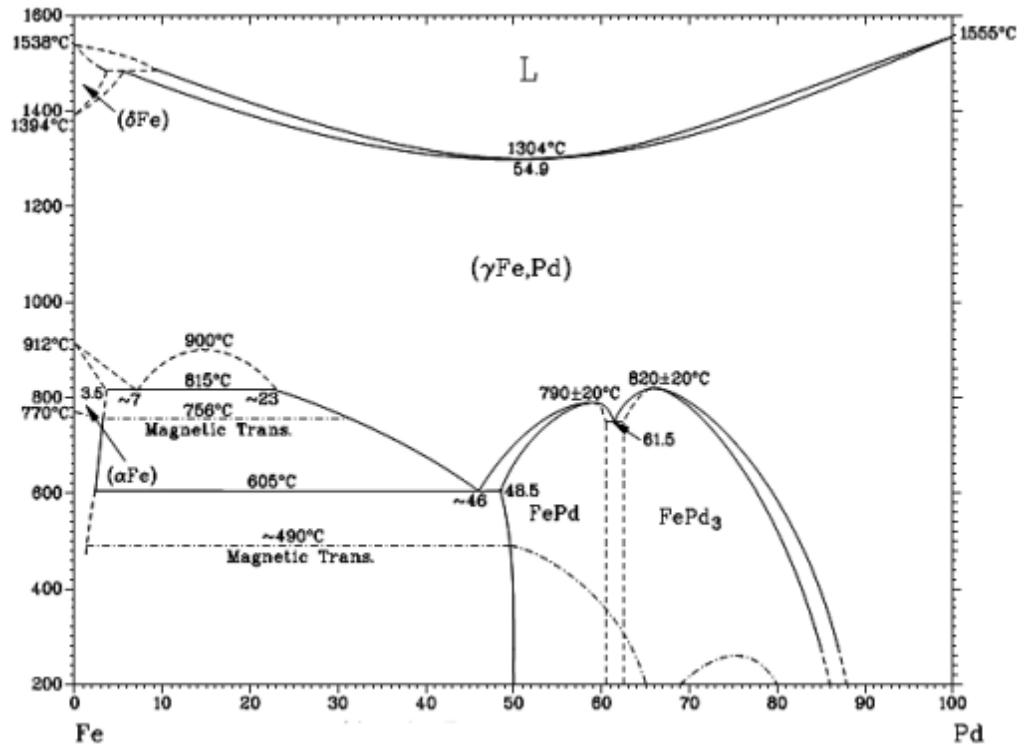


Рисунок 1.6 – Діаграма стану фазової рівноваги системи Fe-Pd [23]

Якщо склад Fe-Pd близький до еквіатомного Fe:Pd=1:1, то атомне впорядкування призводить до формування атомно-впорядкованої фази типу $L1_0$, параметри решітки $a=b=3,852 \text{ \AA}$, $c=3,723 \text{ \AA}$, просторова група $P4/mmm$ [23]. Трьох вимірну модель структури $L1_0$ наведена на рис 1.7 а.

Якщо склад Fe-Pd близький до складу Pd:Fe =3:1, то атомне впорядкування призводить до формування атомно-впорядкованої фази типу $L1_2$, параметр решітки $a=3,852 \text{ \AA}$, просторова група $Pm3m$ [23]. Трьох вимірну модель структури $L1_2$ наведена на рис 1.7 б.

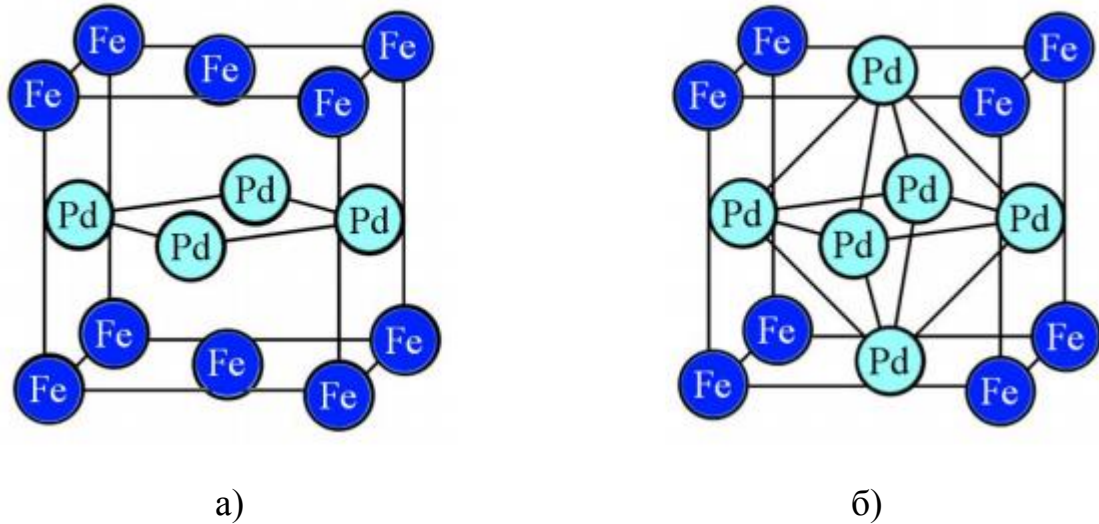


Рисунок 1.7 – Модель положення атомів в структурі $L1_0$ [23] (а) та в структурі $L1_2$ [23] (б)

1.5 Дифузійні процеси та твердофазні реакції у плівках FePd

Вивчення твердофазних реакцій проводиться в контексті формування впорядкованої фази. Так, Endo та інші автори [24] провели дослід для вивчення магнітних характеристик фази $L1_0$, яка була сформована у багатошарових плівках FePd після відпалу за температур (300-700) °C тривалістю одна година з товщиною заліза 2,5 нм та такими товщинами паладію: 0,75 нм, 2,5 нм, 2,75 нм, 3,25 нм, 4 нм та 5,5 нм. В ході проведення дослідів було виявлено дифракційні картини, які зображені на рис 1.8.

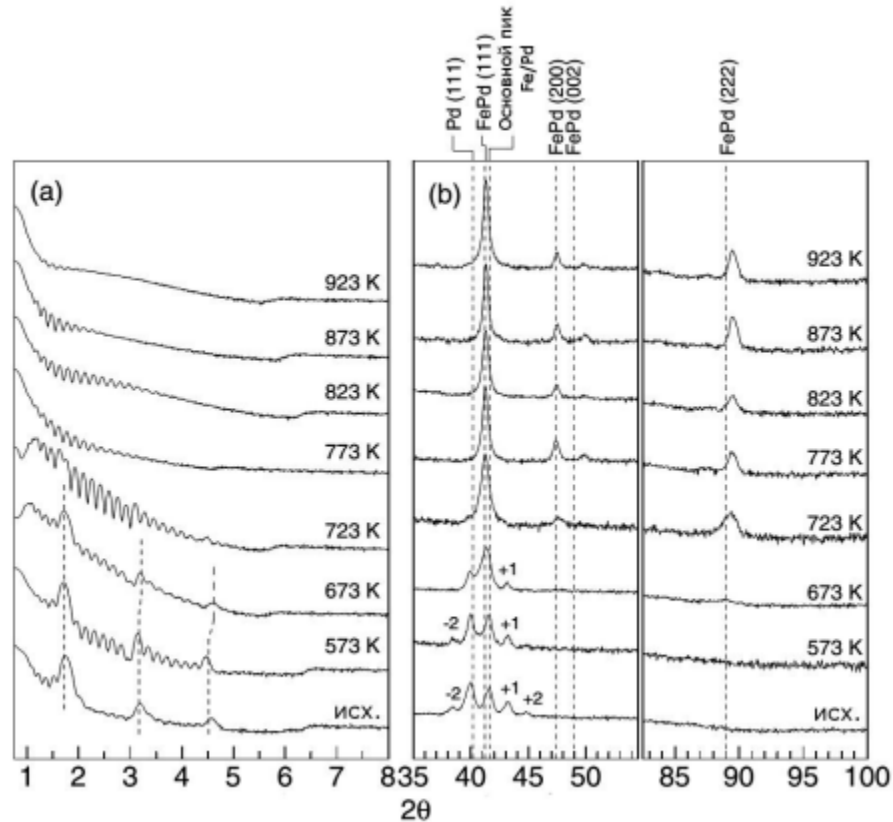


Рисунок 1.8 – Картини дифракції рентгенівських променів, отримані від плівки $[\text{Fe}(2,5 \text{ нм})\text{-Pd}(3,25 \text{ нм})]$ при відпалі за різних температур [24]

Зміни рефлексів на рис. 1.9 показують, що твердофазні реакції між шарами Fe та Pd починаються вже при відпалі в вакуумі за температури 400°C .

В [25] були продемонстровані результати досліджень процесів атомного впорядкування в плівці FePd при відпалі в діапазоні температур $(400\text{-}650)^\circ\text{C}$. За 400°C йде швидка взаємодифузія шарів й виникає впорядкована фаза $L1_0$ у вигляді індивідуальних впорядкованих шарів.

Мягков та інші автори [26] вивчали твердофазний синтез та атомне впорядкування в плівках Fe-Pd-MgO сумарною товщиною 200 нм та з атомним співвідношенням $\text{Fe}:\text{Pd}=1:1$ методом дифракції рентгенівських променів та визначення намагніченості насичення при відпалі за температурами $(300 - 550)^\circ\text{C}$ з кроком у 50°C протягом 30 хвилин. Як було сказано раніше, за

400 °C відбувається взаємодифузія між шарами Fe та Pd, закінчення реакції було зафіксовано при 500 °C.

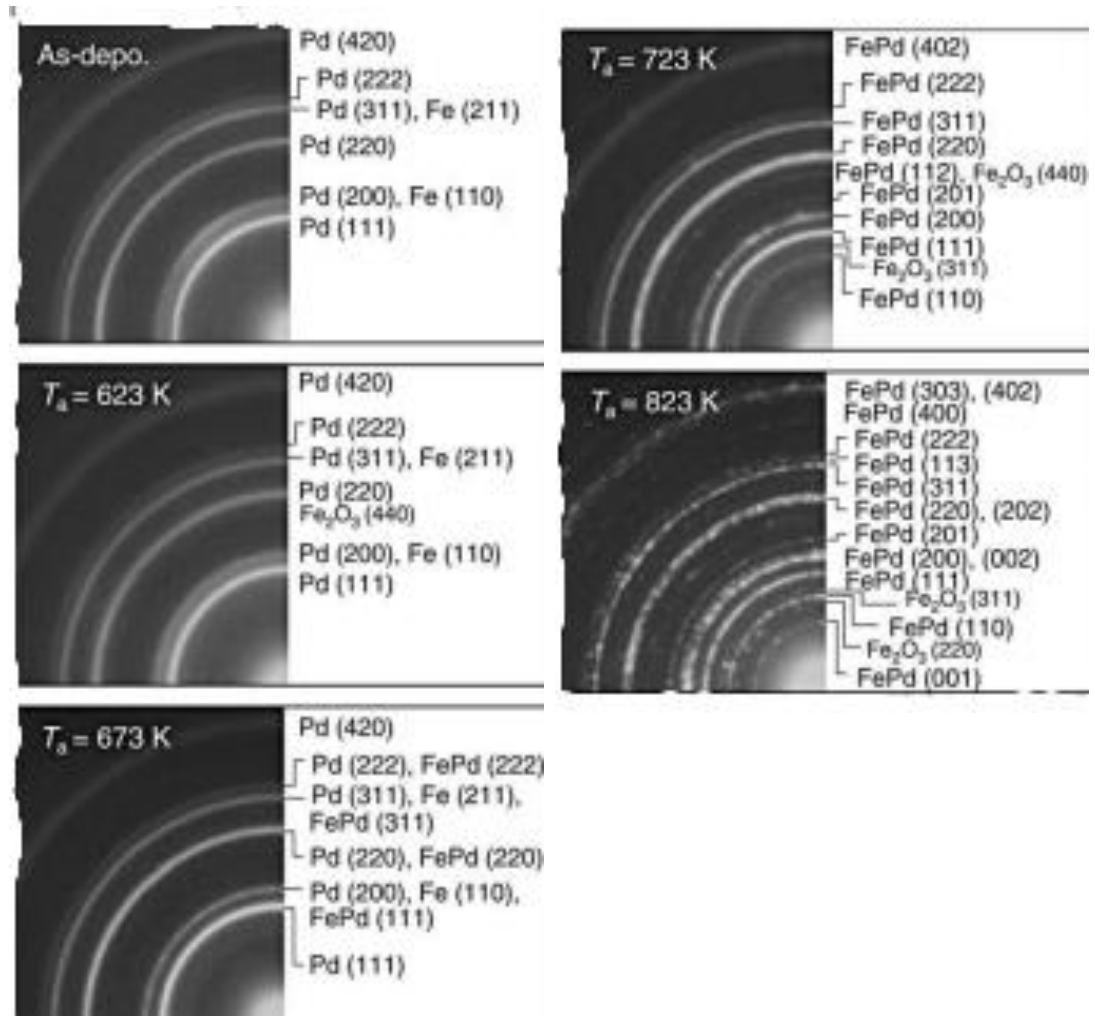


Рисунок 1.9 – Зміна інтенсивності рефлексів Fe та Pd при відпалі за різними температурами в плівковій композиції [Fe(2,5 нм)/Pd(3 нм)] [24]

Аналогічні досліді було проведено на плівках Fe-Pd-MgO, але за більшою товщиною 300 нм та іншим атомним відношенням Pd:Fe = 3:1 при відпалі за температур (300-650) °C з кроком у 50 °C протягом 30 хвилин [27]. При відпалі за температур (450-500) °C йде реакція паладію зі створеним шаром фази L1₀, що призводить до формування впорядкованої фази L1₂.

1.6 Вплив відпалу у атмосфері H_2 на процеси фазоутворення у плівках FePd/Ag

Однією з особливостей водню є його здатність дифундувати в метали за певними умовами наприклад: підвищений тиск або температура. При охолодженні металу, більша частина водню виділяється. Як видно з таблиці 1.1 найбільша розчинність водню спостерігається у паладії, а саме 850 об'ємів H_2 на 1 об'єм Pd. Розчинність водню в металах пояснюється його здатністю дифундувати через кристалічну ґратку.

Таблиця 1.1 – Розчинність H_2 в металах [28]

Метали або сплави	Температура, $^{\circ}C$	Розчинність водню, $cm^3/100\text{ г}$
Молибден	1000	1,2
	1100	1
	1200	0,6
Срібло	600	0,019
	800	0,036
	900	0,046
Олово	400	0,1
	500	0,33
Паладій	138	439,7
	221	210,9
	315	146,5
	519	98,8
	620	89,9
	1022	81

Як видно з рисунку 1.10, при відпалі плівки FePd/Ag в атмосфері водню за температури 600 °С протягом однієї години піки фази FePd на дифрактограмі відсутні. Це може бути пов'язаним з тим, що товщина плівки становить лише 5 нм, а отже найбільша кількість атомів розподілена в межах зерна.

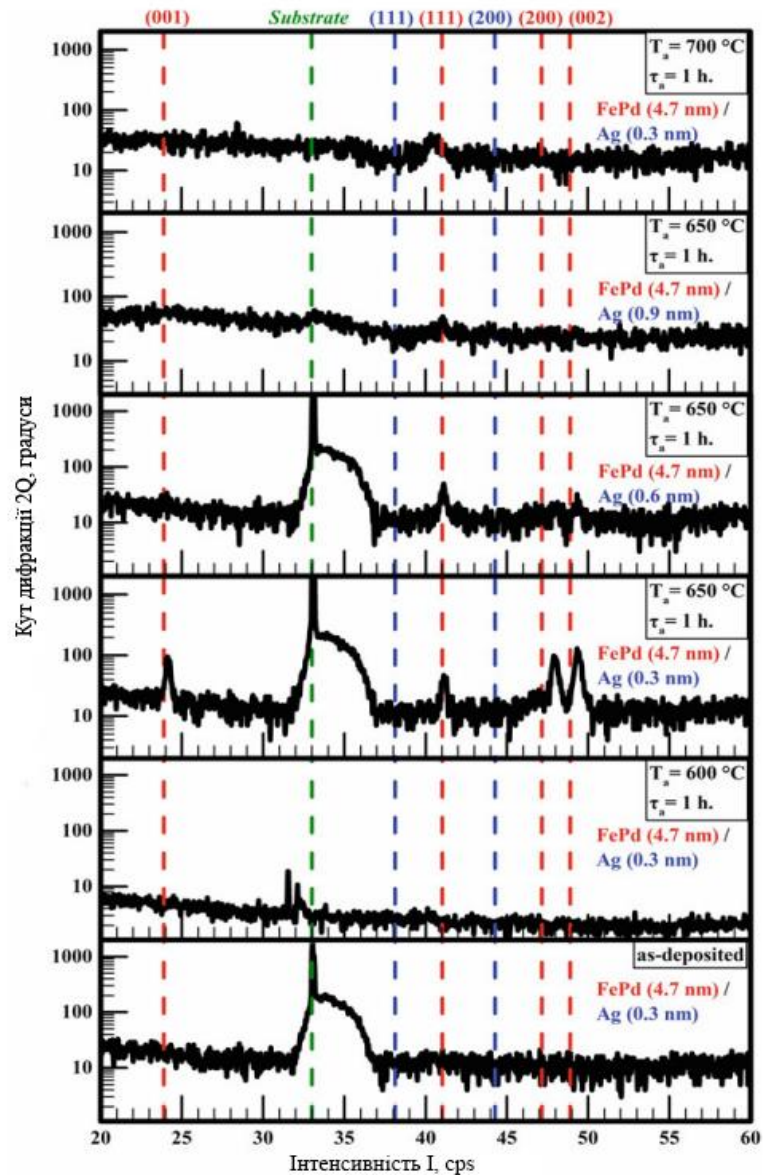


Рисунок 1.10 – Картини дифракції за різними температурами, які були отримані на плівці FePd/Ag[29]

На рисунку 1.11 магнітні вимірювання вказують на те, що магнітно-твердої фази не утворилося, а також що плівка суперпарамагнітна.

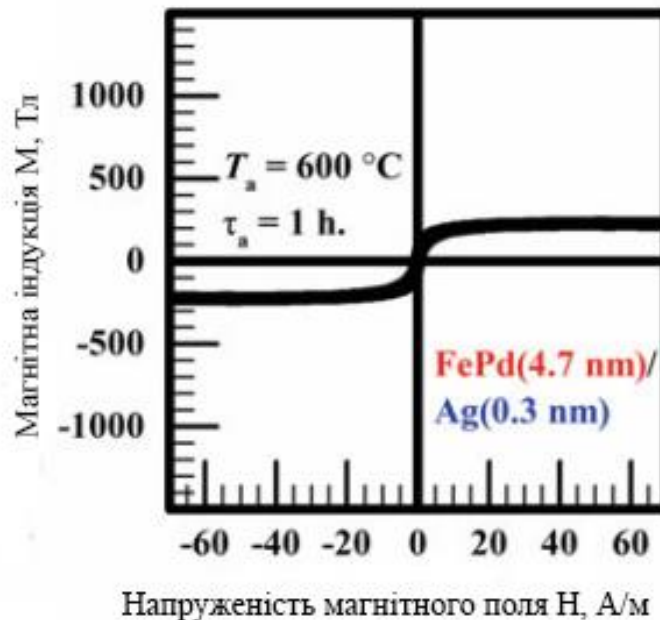


Рисунок 1.11 – Залежність намагнічування від напруженості магнітного поля [29]

Процес впорядкування прискорюється при відпалі у водні. Як видно на рис. 1.10 при відпалі в атмосфері водню за температури $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ на дифракційній картині з'являється пік (001), що вказує на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePd в цьому шарі. Також, розглядаючи петлі гістерезису, можна зробити висновок, що крім магнітно-твердої фази $L1_0$ існує магнітно-м'яка неупорядкована фаза A1-FePd (111).

Після відпалу за температури $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом однієї години рефлекс (001) майже відсутній й можна спостерігати тільки пік фази A1-FePd (111) низької інтенсивності (рис.1.10). Крім того, результати магнітних вимірювань на рис. 1.12 вказують на відсутність магнітно-твердої фази.

Була також досліджена температурна залежність шорсткості поверхні плівки (рис. 1.13). Кількість срібла незначно впливає на шорсткість поверхні. Для всіх трьох плівок поверхнева шорсткість майже однакова, і приблизно дорівнює 9 нм, що значно нижче ніж при відпалі у вакуумі за температурі 600 °C протягом 20 годин (рис. 1.13).

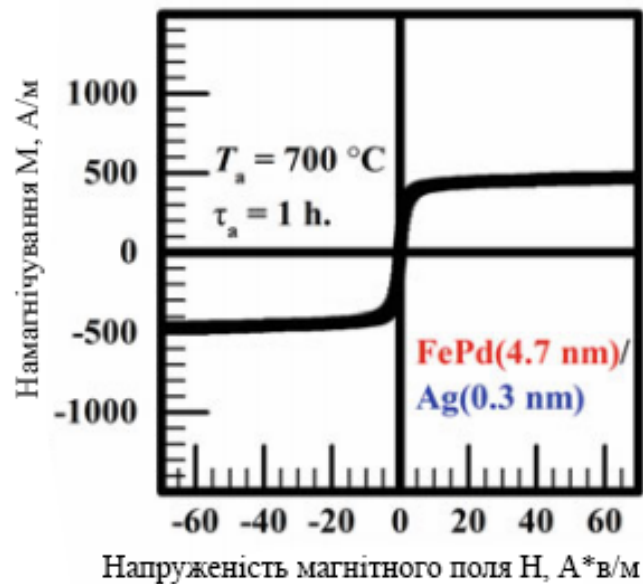


Рисунок 1.12 – Залежність намагнічування від напруженості магнітного поля [29]

Така різниця формування упорядкованої фази та розупорядкування зумовлена впливом водню. Атоми водню проникають в ґратку FePd та розташовуються в октаедричних та тетраедричних порах. Це збільшує об'єм елементарної ґратки FePd й послаблює зв'язок між атомами, що сприяє формуванню магнітно-твердої фази $L1_0$ [29–32].

- FePd(4.7 nm)/Ag(0.3 nm) annealed in H₂ atm. for 1 h.
- ▲— FePd(4.4 nm)/Ag(0.6 nm) annealed in H₂ atm. for 1 h.
- ▼— FePd(4.1 nm)/Ag(0.9 nm) annealed in H₂ atm. for 1 h.
- FePd(4.7 nm)/Ag(0.3 nm) annealed in vacuum for 20 h.

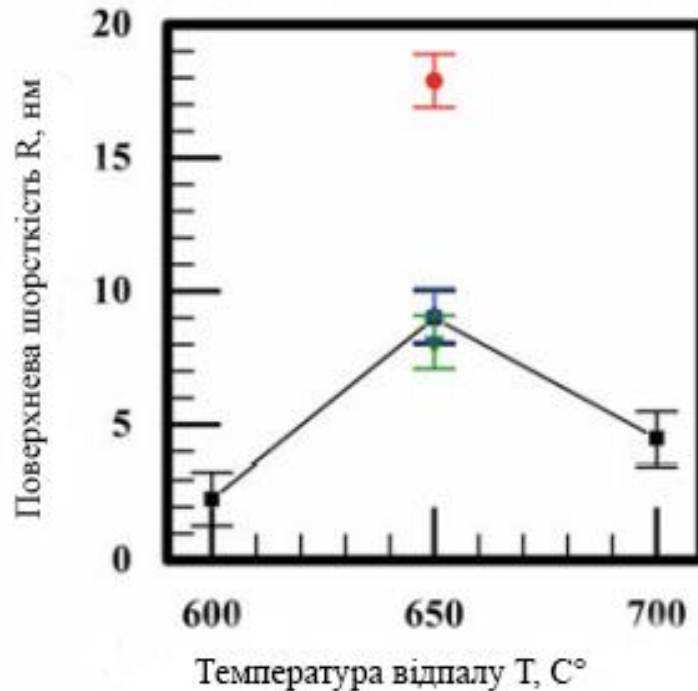


Рисунок 1.13 – Залежність поверхневої шорсткості від температури відпалу [29]

В роботі Estela Gonzales та ін. електронна структура та зв'язки у сплавi Fe-Pd обчислювались методом жорсткого зв'язування. Поглинання водню виявляється сприятливим процесом в обох структурах A1 та L1₀-FePd. Водень в тетраєдричних порах для ГЦТ структури навіть на 2,2 еВ стабільніший, ніж в октаєдричних пустотах ГЦК структури. У ГЦК структурі формуються зв'язки Fe-H та Pd-H в той час, коли на границі розподілу Fe-Pd спостерігаються антизв'язані заповнені стани поблизу рівня Фермі. У ГЦТ структурі густина перекриття зв'язків Fe-Fe зменшується, в той же самий час зв'язки Pd-Pd

практично не піддаються зміні. Міжфазні зв'язки Fe-Pd практично не підлягають впливу водню [30].

1.7 Мета дослідження

Мета цієї роботи полягала у дослідженні формування фазового складу та структури в нанорозмірних плівках FePd(5 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) при відпалах у вакуумі та атмосфері водню. Для досягнення мети необхідно було дослідити зміни фазового складу та структури, морфології поверхні та магнітні властивості плівок Fe₅₀Pd₅₀ (5 нм) після відпалів у вакуумі та водні. Для цього було використано методи електроннографічного аналізу, електронного парамагнітного резонансу та атомно-силової мікроскопії.

1.8 Висновки до розділу 1

У наші часи використовується технологія перпендикулярного магнітного запису інформації. Але, для збільшення щільності магнітного запису потрібно переходити на термічно-активований метод магнітного запису.

Впорядкована фаза L1₀ - FePd перспективна для використання як матеріал для магнітного запису інформації. Для отримання впорядкованої фази L1₀ необхідно провести відпал вище за 400 °С.

Відпал за температури 650 °С у атмосфері водню протягом однієї години призводить до утворення упорядкованої магнітно-твердої фази L1₀ з яскраво вираженою анізотропією магнітних властивостей та меншою поверхневою шорсткістю, що є важливим фактором практичного застосування FePd(5 нм) при відпалі у водні порівняно з відпалом у вакуумі.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали дослідження

У роботі досліджено нанорозмірні тонкі плівки на основі сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ товщиною 5 нм. В якості підкладки використовувався термічно окиснений монокристалічний кремній з орієнтацією (001).

2.2 Магнетронний метод отримання тонких плівок

Плівкові композиції на основі сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) отримано методом магнетронного осадження на підкладки термічно окисненого монокристалічного кремнію за кімнатної температури.

Магнетронне осадження засновано на розпорошенні матеріалу, з якого виготовлена мішень для магнетрона, при бомбардуванні іонами робочого газу, який утворюється в плазмі аномально-тілючого розряду. Висока швидкість розпорошення, характерна для цих систем, досягається збільшенням щільності іонного струму за рахунок локалізації плазми, яка розпилюється на поверхні мішені за допомогою сильного поперечного магнітного поля [33]. Основними елементами магнетронної розпилювальної системи є катод, анод і магнітна система, призначена для локалізації плазми у поверхні мішені – катода (рис. 2.1).

Між катодом і анодом подається постійна напруга від джерела живлення, за рахунок чого між ними виникає неоднорідне електричне поле E , яке збуджує аномальний тілючий розряд в середовищі робочого газу (зазвичай чистого Ar).

Утворені при цьому іони бомбардують катод, що приводить до емісії електронів і розпорошення поверхні катода – мішені. Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони прискорюються електричним полем E і починають рухатися у напрямку аноду. Наявність замкнутого магнітного поля у

поверхні мішені, яка розпорошується, дозволяє локалізувати плазму розряду безпосередньо в області мішені. Також магнітне поле не дає електронам з високою швидкістю, які не зіткнулись з атомами робочого газу, долетіти до підкладки. Тому підкладка не нагрівається внаслідок бомбардування її вторинними електронами.

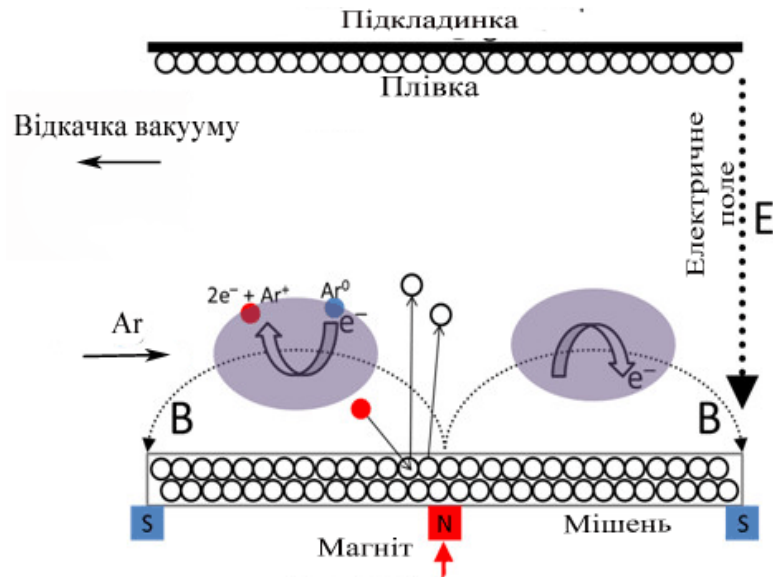


Рисунок 2.1 – Схема магнетронного методу розпорошення [33]

Електрони захоплюються магнітним полем, починають рухатися по складній циклоїдальній траєкторії біля поверхні катода. Такий циклоїдальний рух електронів забезпечує кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу до того моменту, поки електрони не втратять отриману від електричного поля енергію [34]. При цьому максимальна щільність плазми зосереджена біля поверхні мішені, в області між полюсами магнітного поля. Це обумовлює збільшення інтенсивності іонного бомбардування поверхні мішені і значне зростання швидкості розпорошення, та, в кінцевому підсумку, збільшенню швидкості осадження атомів на поверхні підкладки.

Таким чином сумарна теплова енергія, що розсіюється на підкладці, а, отже, і температура підкладки залежать не тільки від конструкції і режимів роботи розпорошувальної системи, але і, великою мірою, від матеріалу мішені. Основним джерелом нагрівання підкладки є енергія, що виділяється при гальмуванні і конденсації осаджених атомів речовини мішені, в результаті чого температура підкладки не перевищує $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дає можливість осаджувати плівки на підкладки з матеріалів з малою термостійкістю (пластики, полімери, оргскло і так далі). Типові значення сумарної теплової енергії варіюються від (10 до 70) еВ/атом [35].

Товщина плівкового матеріалу є найважливішою характеристикою. Тому для контролю товщини осаджених шарів використовуються наступні методи:

- контроль за допомогою кварцового резонатора;
- виходячи зі швидкості розпорошення мішені;
- профілометричний аналіз.

2.3 Термічна обробка в атмосфері водню

Термічна обробка нанорозмірних плівок проводилась в установці типу Сівертса. Швидкість нагріву і тривалість відпалу складала $1\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{с}$ та 0,5 - 2 години, відповідно. Деструктивне наводнення зразків проводилось шляхом послідовного дрібнокрокового наводнювання зразків в інтервалі температур $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ під тиском водню 101,3 кПа. Перед напуском газової атмосфери камера попередньо відкачувалася до тиску 10^{-1} Па за допомогою вакуумного механічного насосу ЗНВРД.

2.4 Відпал у вакуумі

Відпал проводили на приладі ВУП-5М (вакуумний універсальний пост). Вакуум був не нижче $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Зразки відпалювали в інтервалі температур $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нагрів до відповідної температури відбувався протягом (2 – 4) хвилин. Тривалість відпалу складала (0,5 – 2) години. Після цього зразки охолоджувалися у вакуумі до температури $\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5 Методи дослідження

2.5.1 Електронографічний аналіз

Електронографічний аналіз засновано на хвильових властивостях електронів та поділяється на: мікроскопічний і дифракційний. В найбільш поширених електронографах та електронних мікроскопах застосовують електричні поля з прискорюючим напруженням $V=(40\div 100)$ кВ. На рис. 2.2 показана схема електронографа де 1 – електронна пушка, 2 – катод, 3 – фокусуєчий електрод, 4 – анод, 5, 6 – електромагнітні лінзи, 7 – кристалотримач, 8 – фотопластинка [36]. Довжина хвилі рухомого електрона визначається згідно з рівнянням де Бройля:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e \cdot v_e} \quad (2.1)$$

де h – постійна Планка;

m_e – маса електрона;

v_e – швидкість електрона.

Дифракцію електронів які були розсіяні кристалічною ґраткою, як і дифракцію рентгенівських променів, добре описує рівняння Вульфа-Бреггів, яке для невеликих кутів Θ має вигляд:

$$r = \frac{\lambda_e \cdot L}{d_{HKL}} \quad (2.2)$$

де r – відстань від рефлексу до сліду первинного пучка електронів, м;

L – відстань від зразка до фотографічної пластинки.

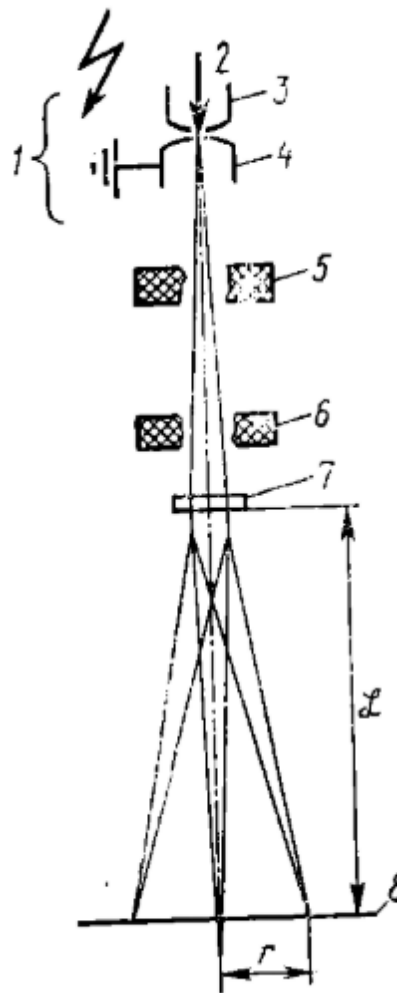


Рисунок 2.2 – Принципова оптична схема електроннограма [36]

Якщо зразок складається з безліч безладно орієнтованих кристалів, то електронні хвилі зазнавши дифракцію на однакових кристалічних площинах, утворюють конус пучка електронів перетинаючи екран по кільцю, радіус якого r (2.2).

Електронографічним аналізом вирішують точно такі самі задачі, що й рентгенографічним методом, наприклад: орієнтацію, текстуру, фазовий состав кристалічної будови речовини. Метод електронографічного аналізу застосовують для аналізу порошків та тонких плівок, а також поверхневого шару масивних зразків. Для цього існує 2 методи роботи: «На просвічування» та «На відображення» [36].

2.5.2 Атомно-силова мікроскопія

Поверхневу шорсткість плівкових матеріалів досліджено за допомогою методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) з використання приладу Digital Instruments Dimension 3000.

Атомно-силовий мікроскоп – один із видів скануючого зондового мікроскопа, який використовується для вимірювання рельєфу поверхні, її модифікації, а також для маніпулювання мікро- і нанооб'єктами на поверхні. Роздільна здатність методу складає приблизно 0,1 нм – 1 нм в горизонтальному напрямку і 0,01 нм в вертикальному. Зміщуючи зонд по горизонталі, можна отримати серію рельєфів і за допомогою відповідного програмного забезпечення побудувати тривимірне зображення.

Сканування поверхні в методі атомно-силової мікроскопії відбувається завдяки взаємодії мікрозонда (кантилевера) та поверхні досліджуваного матеріалу. Мікрозонд являє собою масивну кремнієву пластину з виступаючою з

нього еластичною балкою, на кінці якої знаходиться шип, за допомогою якого і здійснюється сканування поверхні (рис. 2.3) [37].

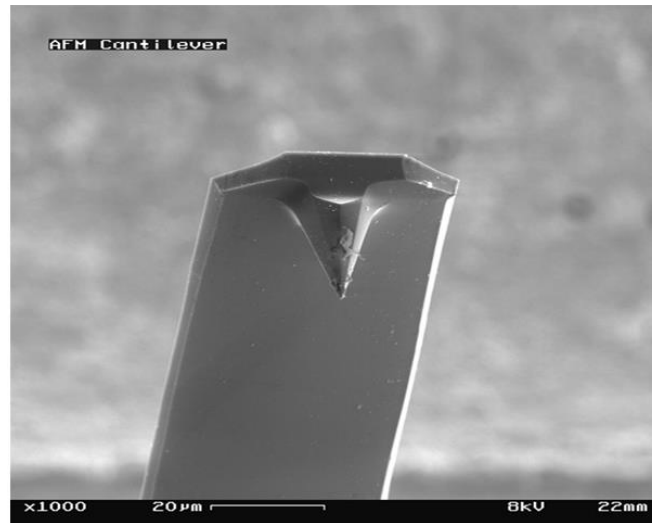


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд кантилевера, що використовується для контакту зі зразком в методі атомно-силової мікроскопії [37]

Схематичне зображення принципу дії атомно-силового мікроскопу наведено на рис. 2.4. В режимі сканування поверхні високоточне переміщення області під шипом забезпечується п'єзoeлектричними елементами, які змінюють свою довжину в залежності від прикладеної напруги. Лазерний промінь відбивається від верхньої поверхні консольної балки з прикріпленою до нього дзеркалом і потрапляє в центр детектора, що розділений на 4 сектори. Таким чином, коли зонд опускається і піднімається в залежності від топографії поверхні, відбитий промінь відхиляється, і це відхилення реєструється матричним фотодетектором, а сила, з якою шип притягується до атомів – п'єзодатчиком. Отриманий сигнал аналізується за допомогою електроніки й перетворюється в зображення рельєфу поверхні. Для забезпечення постійної сили між поверхнею матеріалу та щупом і запобігання пошкоджень, використовується електронний механізм зворотного зв'язку.

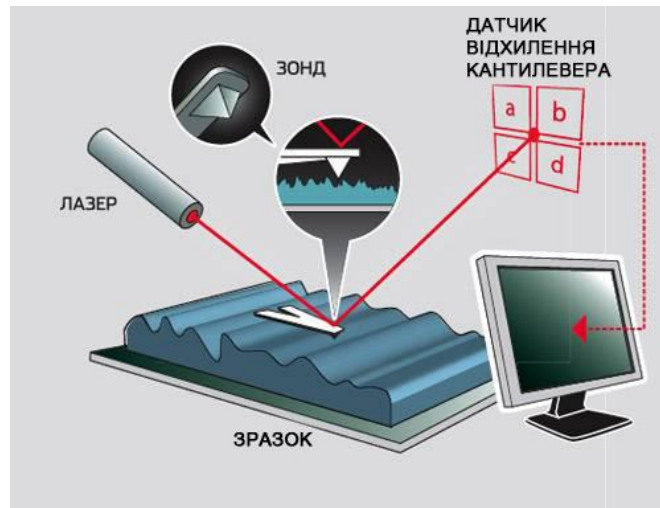


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення принципу реєстрації сигналу в методі атомно-силової мікроскопії [38]

При різних відстанях між поверхнею зразку і голкою наступні режими роботи атомно-силового мікроскопа:

- контактний режим;
- безконтактний режим;
- вібраційний режим.

При контактному режимі відстань від голки до зразка становить близько кількох десятих нм. Таким чином, голка знаходиться в м'якому фізичному контакті зі зразком і знаходиться в полі сил відштовхування. У цьому випадку взаємодія між голкою і зразком змушує кантилевер згинатися, відтворюючи топографію поверхні. Топографічні зображення в методі атомно-силового мікроскопі зазвичай отримують в одному з двох режимів:

- режим постійної висоти;
- режим постійної сили.

При безконтактному режимі кантилевер за допомогою п'єзокристалу коливається над досліджуваною поверхнею з амплітудою ~ 2 нм і частотою 100 КГц – 1 МГц. За зміною амплітуди або зсуву резонансної частоти коливань в

ході сканування поверхні визначається сила тяжіння і формується зображення поверхні. Цей режим підвищує чутливість атомно-силового мікроскопу. Вібраційний режим є аналогічним безконтактному режиму, але з тією відмінністю, що вістря голки кантилевера в нижній точці своїх коливань злегка торкається поверхні зразка на короткі проміжки часу внаслідок чого роздільна здатність є такою ж, як при контактному режимі, а пошкодження зразка чи голки відсутні [37–38].

2.5.3 Метод електронного парамагнітного резонансу

Електронний парамагнітний резонанс (ЕПР) — фізичне явище, яке полягає у вибіркового поглинанні електромагнітних хвиль парамагнітною речовиною, яку помістили у зовнішнє магнітне поле [39].

В вимірювальний резонатор поміщається ампула із зразком та піддається впливу магнітного поля і надвисокочастотне випромінювання (НВВ). Виходячи із завдань дослідження величини напруженості магнітного поля H , і швидкість та діапазон його зміни ΔH можуть приймати такі значення $H=(100\div 4500)$ Е та $\Delta H=(100\div 900)$ Е. Під час роботи спектрометра частота коливань не змінюється та дорівнює близько 10 Гц.

Високочастотна модуляція магнітного поля використовується для реєстрації першої похідної спектра в формі першої похідної лінії. На постійне магнітне поле накладається змінне поле з частотою $(30\div 3)$ кГц.

Якщо значення магнітного поля відповідає резонансному, то відбувається поглинання речовиною енергії НВВ, і в результаті на детекторі НВВ виділяється сигнал поглинання, який промодульовано високою частотою.

Як видно на рис. 2.5 сигнал поступає на підсилювач, де відбувається: посилення, компенсація наведеної опорної частоти та коригування фази. Потім демодульований сигнал ЕПР проходить через фільтр низьких частот. Сигнал ЕПР який був відфільтрований може бути поданий на вхід вертикальної розгортки осцилографа або після підсилення посилювачем постійного струму може бути поданий на вхід самописця

Для контролю роботи і настройки спектрометра в ньому передбачений вузол контролю, що дозволяє стежити за наступними параметрами: струмом детектора НВВ ($I_{\text{дет}}$), напруженістю магнітного поля (H_0), сигналом на виході (У), напругою на виході (Х) [40].

Умовою магнітного резонансу є збіг різниці енергій рівнів, між якими відбувається перехід, залежить від зовнішнього поля В, з енергією кванта електромагнітного випромінювання, тобто:

$$\Delta E = 2\mu_B B = g\mu_B B = h\nu \quad (2.3)$$

де ΔE – різниця енергій рівнів резонансу;

μ_B – магнетон Бора;

B – зовнішнє магнітне поле;

h – постійна Планка;

g – безрозмірна величина (g-фактор Ланде).

Електрон, володіючи власним моментом кількості руху (спіном) і будучи електрично зарядженою часткою, має магнітний момент:

$$\mu_e = -g\mu_B S, \quad (2.4)$$

де μ_e – магнітний момент електрону;

S – вектор спінового кутового моменту.

Так, у випадку вільного електрону, який не має свій орбітальний момент $g = 2,0023$. Невеликі зміни g -фактора свідчать про локальну зміну оточення центру.

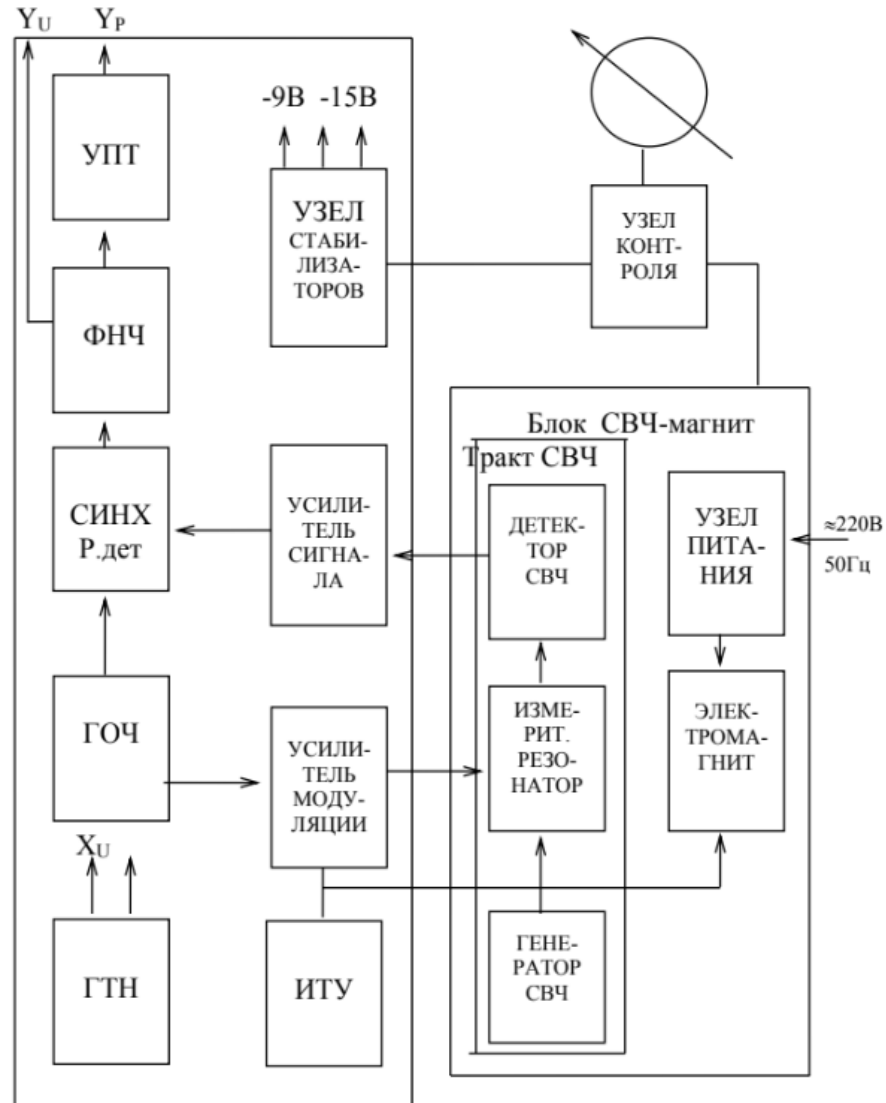


Рисунок 2.5 – структурна схема спектрометра ЕПР [40]

Фактор g є одним з основних фізичних характеристик спектрів ЕПР. Фактор g входить до умов резонансу та є вирішальною характеристикою положень ліній резонансного поглинання в спектрі ЕПР. Спектроскопічний фактор розщеплення Ланде або g -фактор дорівнює відношенню електронного магнітного моменту до повного кутового моменту [40].

При сильному кристалічному полі g -фактор розраховується за формулою:

$$g = 2,0023 - \frac{8\lambda}{\Delta} \quad (2.5)$$

де λ – стала спін-орбітального зв'язку;

Δ – енергетичний інтервал від даного рівня до найближчих активних рівнів.

Така ситуація зазвичай реалізується для іонів групи заліза в кристалах.

Анізотропія g -фактора характерна відміна іона у кристалі, від вільного іона коли в першому випадку є внутрішнє кристалічне поле. Ця анізотропія пояснюється тим, що внаслідок спін-орбітальної взаємодії кристалічне поле створює додаткове поле з певною симетрією, яке впливає на спіновий момент електронів. Тому, після прикладення зовнішнього магнітного поля спін вже орієнтовано взаємодією з кристалічним полем, тобто магнітне розщеплення відбувається в залежності від існуючого орієнтування магнітного поля відносно осей кристалу.

Анізотропія – це відображення тензорної природи g -фактора. За допомогою локальної симетрії парамагнітного центру та його найближчого оточення можна визначити вид тензора. Можна виділити 3 типи симетрії:

- Кубічна симетрія – ізотропний g -фактор;
- аксіальна симетрія – g -тензор, який приведений до головних осей, характеризується двома компонентами g_{\parallel} та g_{\perp} ;

Ромбічна симетрія – g -тензор, приведений до головних осей та який характеризується трьома компонентами g_x , g_y , g_z [40].

2.6 Висновки до розділу 2

Використано великий спектр сучасного фізичного матеріалознавства: метод магнетронного осадження плівкових композицій, методи

електронографічного аналізу, електронного парамагнітного резонансу та атомно-силової мікроскопії. Всі ці методи дозволяють отримати інформацію про структуру, фазовий склад, морфологію та магнітні властивості плівкової композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Фазові та структурні перетворення у плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ при відпалах у вакуумі та атмосфері H_2

Для дослідження впливу водню на утворення магнітно-твердої фази було знято електронोगрами після відпалів $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ нм})$ у вакуумі та H_2 .

3.1.1 Фазові та структурні перетворення у плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ при відпалах у вакуумі

З рисунку 3.1 видно, що після відпалу з'явився рефлекс (111) дуже слабкої інтенсивності, який може належати, як до неупорядкованої фази A1-FePd, так й до впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$. Така слабка інтенсивність пояснюється дуже малою кількістю сформованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePd.

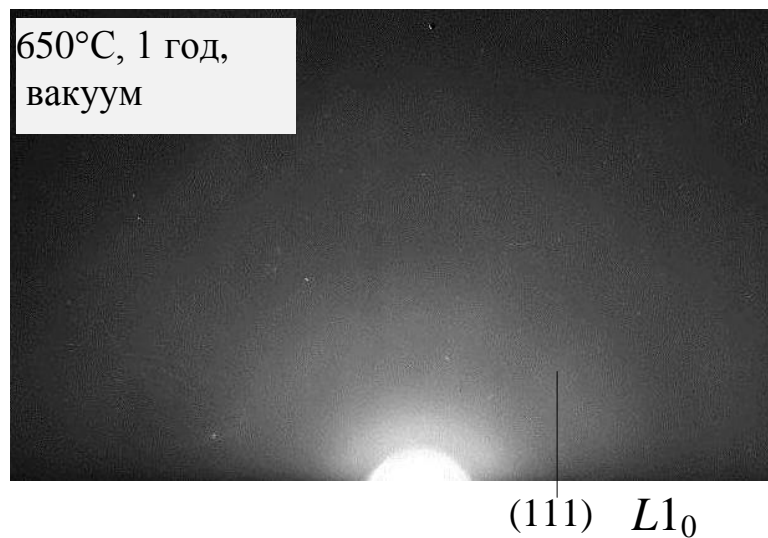


Рисунок 3.1 – Електронोगрама плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ нм})$ після відпалу у вакуумі за температури 650 °C протягом 1 години

При збільшенні тривалості відпалу до 20 годин на рис. 3.2 можна спостерігати більш інтенсивний рефлекс (111) та ледь помітний рефлекс (002) магнітно-твердої впорядкованої фази $L1_0$ -FePd в порівнянні з відпалом тривалістю 1 год (рис. 3.1).

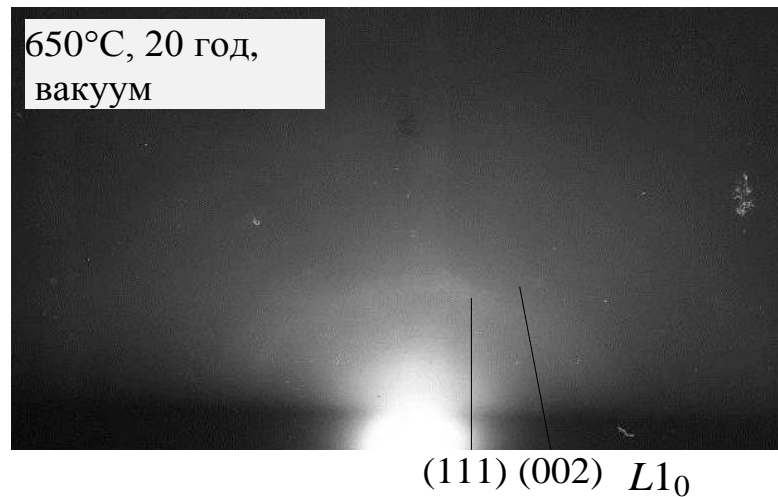


Рисунок 3.2 – Електронограма плівки $Fe_{50}Pd_{50}$ (5 нм) після відпалу у вакуумі за температури 650 °C протягом 20 годин

3.1.2 Фазові та структурні перетворення у плівках $Fe_{50}Pd_{50}$ при відпалах в атмосфері водню

На електронограмі після відпалу у H_2 дифракційна картина зовсім змінилась. З рисунку 3.3 чітко видно рефлекси (111), (200), (220), (311), (222), від неупорядкованої фази A1 – FePd.

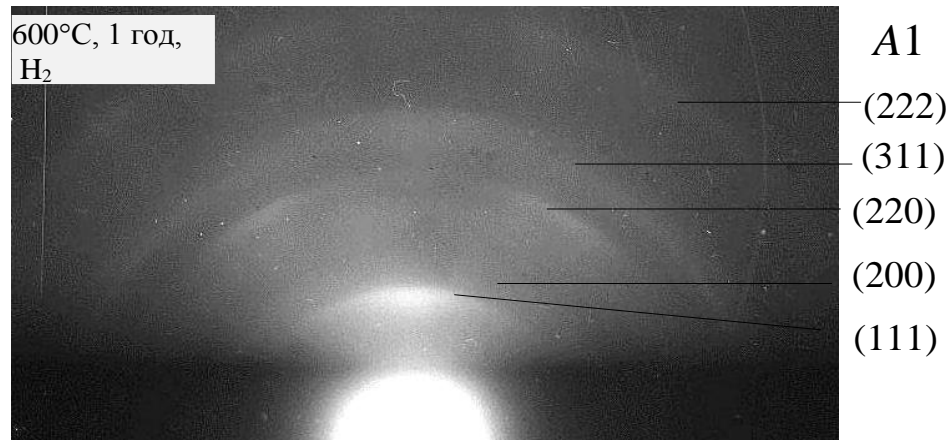


Рисунок 3.3 – Електронограма плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температури 600 °С протягом 1 години

Відпал 650 °С протягом 30 хвилин призводить до збільшення кількості рефлексів на електронограмі внаслідок початку процесу упорядкування у плівці. З'являється надструктурний рефлекс (110) та рефлекси (110), (002), (201), (112), (203), що належать впорядкованій фазі $L1_0$ -FePd (рис.3.4)

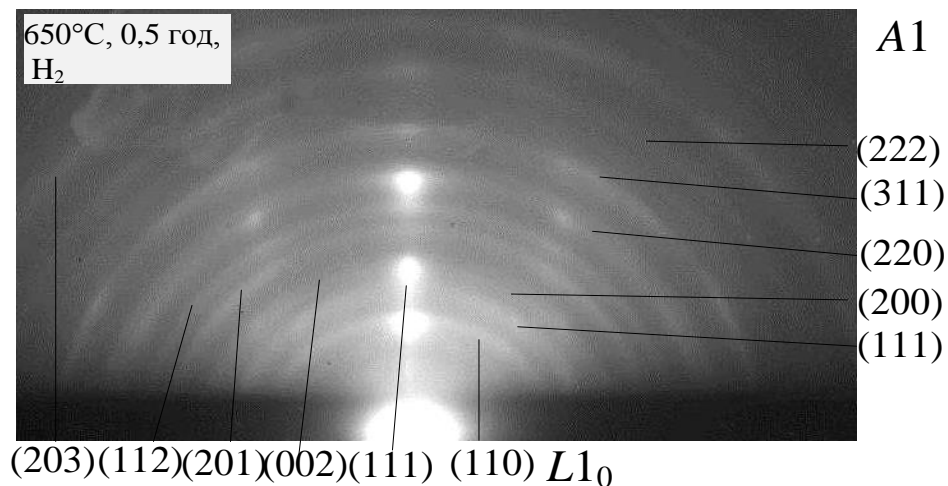


Рисунок 3.4 – Електронограма плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температури 650 °С протягом 0,5 годин

Після відпалу при 650 °С тривалістю 1 година фазове перетворення $A1 \rightarrow L10$ FePd відбулось повністю (рис. 3.5)

Це пояснюється тим, що атоми водню проникають в октаедричні та тетраедричні пори й цим послаблюють зв'язок між атомами Fe та Pd , що сприяє формуванню магнітно-твердої впорядкованої фази $L1_0$.

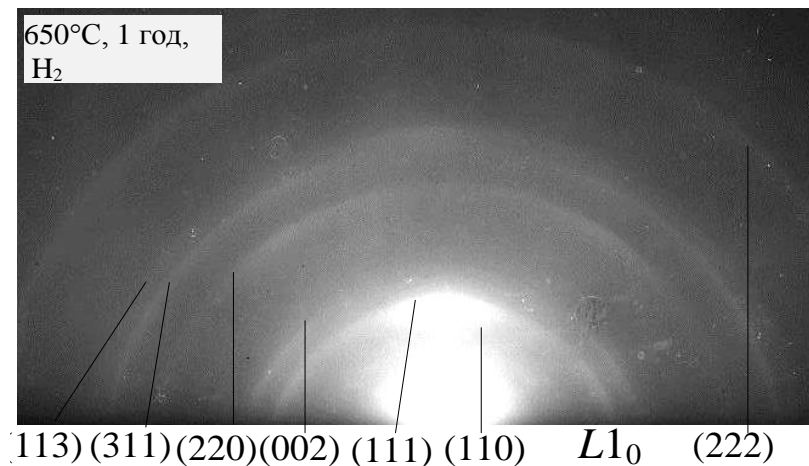


Рисунок 3.5 – Електронограма плівки $Fe_{50}Pd_{50}$ (5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температури 650 С° протягом 1 години

Після відпалу плівки FePd (5 нм) за температури 650 °С протягом двох годин в атмосфері водню на електронограмі, яка зображена на рисунку 3.6, знову спостерігається поява дуже інтенсивних рефлексів від неупорядкованої магнітно-м'якої фази $A1$ та залишаються рефлекси від магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePd. Це свідчить про те, що при збільшенні тривалості відпалу в атмосфері водню відбуваються процеси розупорядкування. Тривалий відпал у водні не сприяє збільшенню ступеню упорядкування та веде до перетворення порядок- безлад ($L1_0 \rightarrow A1$).

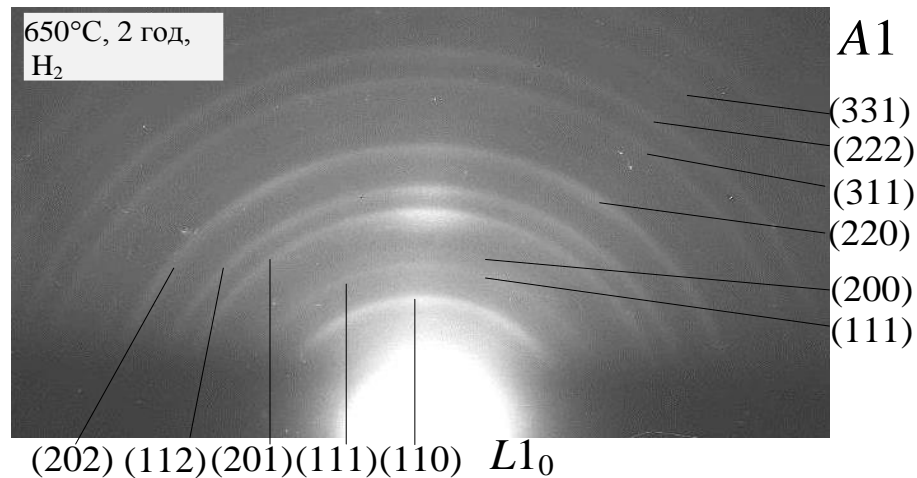


Рисунок 3.6 – Електронограма плівки Fe₅₀Pd₅₀(5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температури 650 °С протягом 2 годин

На рис. 3.7 видно, що при збільшенні температури відпалу в атмосфері водню до 700 °С відбулося перетворення порядок-безлад та зростання зерен неупорядкованої фази A1, про що свідчить нерівномірність розподілення інтенсивності по дифракційному рефлексу.

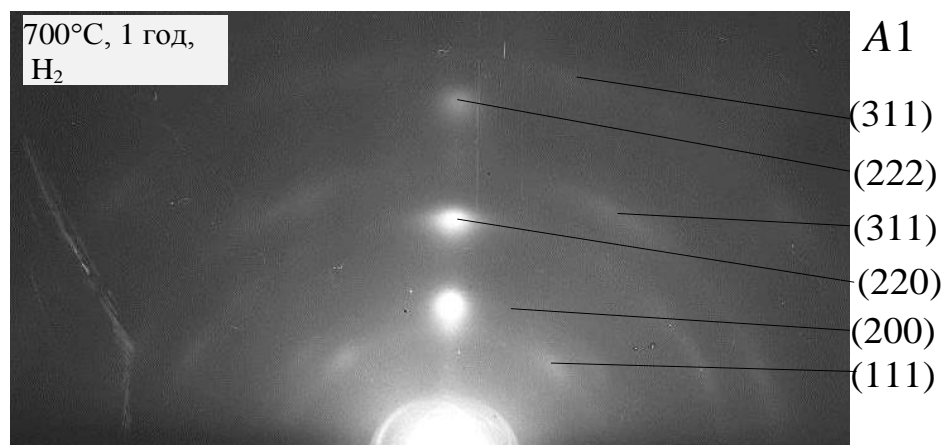


Рисунок 3.7 – Електронограма плівки Fe₅₀Pd₅₀(5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температури 700 °С протягом 1 години

Отже, збільшення часу та температури відпалу вище 650 °C у водні не сприяють процесам упорядкування, а викликають розупорядкування.

3.2 Дослідження зміни морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм)

3.2.1 Зміна морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та при відпалі у вакуумі

На рисунку 3.8 представлено зображення морфології поверхні нанорозмірних плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та відпалу у вакуумі при температурі 700 °C протягом 30 хвилин.

Після осадження та відпалів у вакуумі до температури 700 °C протягом 30 хвилин поверхня плівки гладка (рис. 3.8). Середньоквадратична шорсткість поверхні плівки зменшується від 1,5 нм після осадження до 0,4 нм після відпалу за температури 700 °C (рис. 3.9).

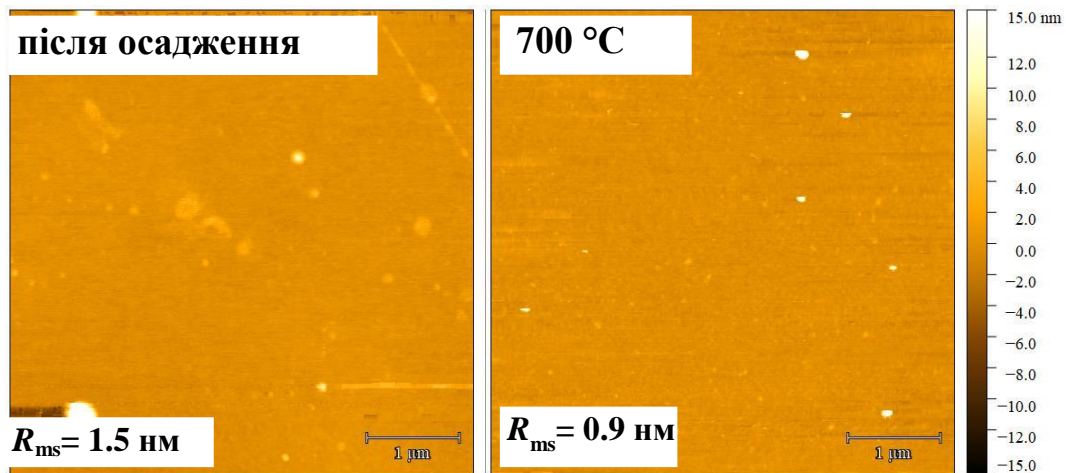


Рисунок 3.8 – АСМ зображення морфології поверхні плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та після відпалу у вакуумі протягом 30 хвилин за температури 700 °C

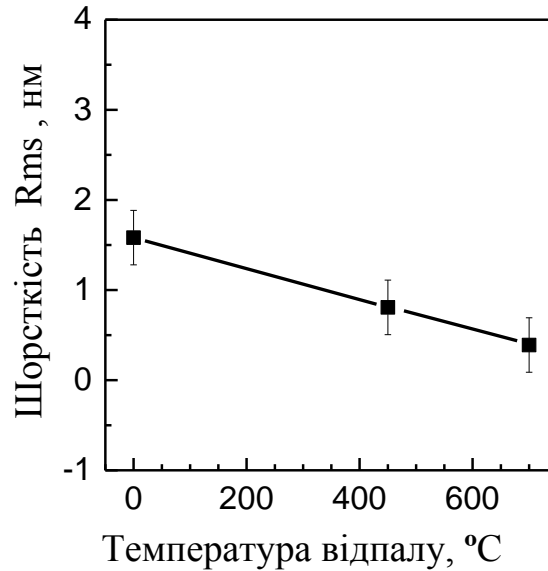


Рисунок 3.9 – Залежність поверхневої шорсткості плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) від температури відпалу у вакуумі протягом 0,5 год

3.2.2 Дослідження зміни морфології плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) при відпалі в атмосфері водню

На рисунку 3.10 наведено зображення поверхні плівок сплаву FePd (5 нм) після відпалу в атмосфері водню за температури 650 °C з витримкою 30 хвилин, 1 та 2 години. Видно, що поверхня плівок після відпалу у атмосфері водню значно відрізняється від поверхні плівок, які були відпалені у вакуумі (рис. 3.8). Після відпалу за температури 650 °C, 1 год середньоквадратична шорсткість поверхні зростає до 8,6 нм. Це свідчить про те, що утворюється впорядкована магнітно - тверда фаза $L1_0\text{-FePd}$ та зростають зерна з текстурою (111) з розташуванням вісі легкого намагнічування у площині плівки. Зазвичай збільшення середньоквадратичної шорсткості спостерігається в інтервалі розвитку та формування магнітно-твердої фази $L1_0\text{-FePd}$.

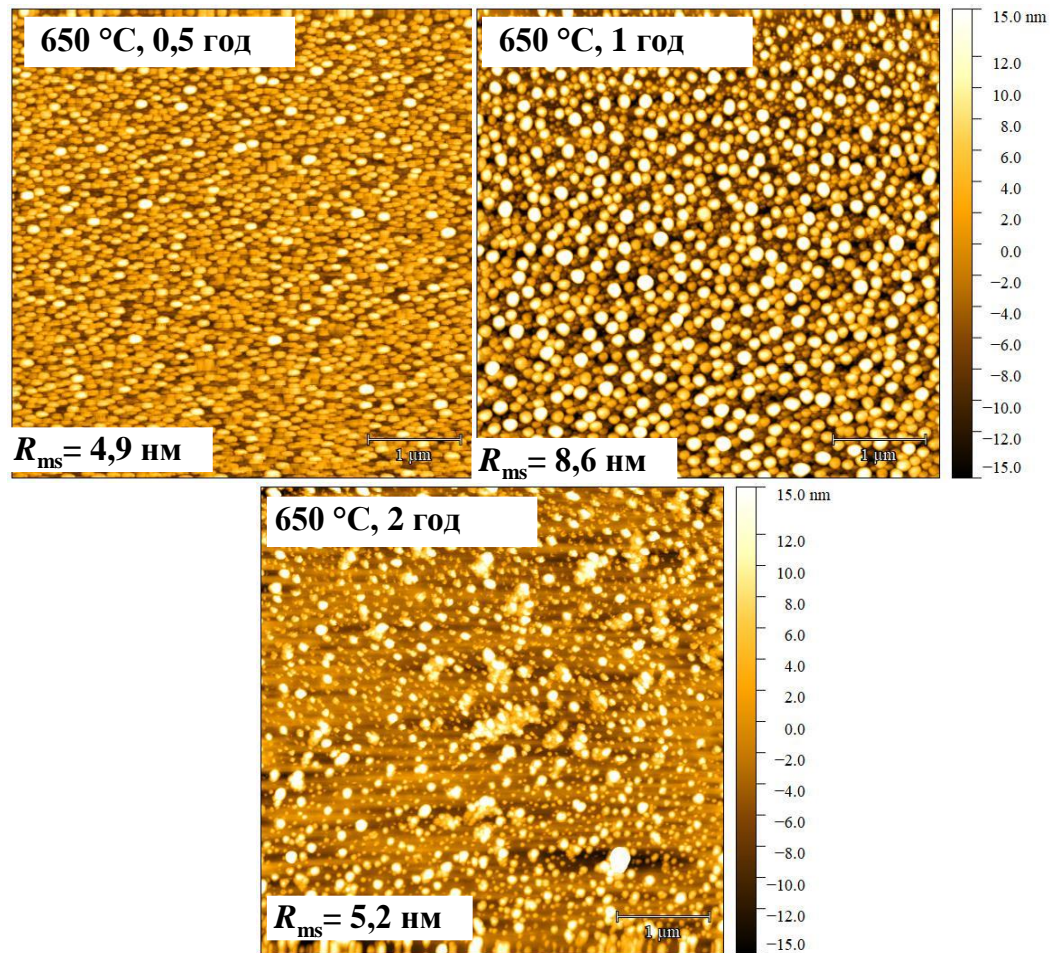


Рисунок 3.10 – АСМ-зображення морфології поверхні плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ nm})$ після термообробки у атмосфері водню за температури 650°C

З рисунку 3.11 видно, що плівка з максимальною кількістю впорядкованої фази $\text{L1}_0\text{-FePd}$ після відпалу у водні 650°C , 1 год має більшу шорсткість, ніж після осадження і відпалів у вакуумі при 650°C протягом (0,5 та 2) годин.

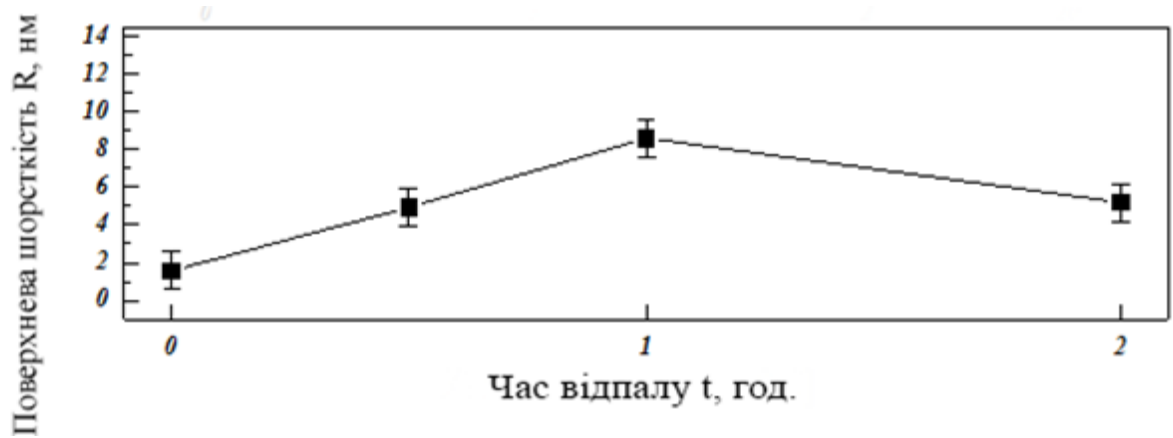


Рисунок 3.11 – Зміна шорсткості плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) зі збільшенням тривалості відпалу за температури 650 °C у атмосфері водню

3.3 Дослідження процесу впорядкування в плівці $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) методом ЕПР

Як витікає з рисунку 3.12 в осаджених плівках спостерігається інтенсивний резонансний пік в інтервалі прикладеного магнітного поля (1500 – 1900) Гаус (0,15-0,19) Тл, який відповідає неупорядкованій фазі A1 - FePd. Кут Θ_H показує напрямок прикладеного поля по відношенню до нормалі до площини плівки.

В осадженій плівці резонансна лінія ФМР(ЕПР) спектра свідчить про наявність магнітно-м'якої фази A1 - FePd. Відпал у вакуумі при 650 °C, 30 хвилин незначно розширює резонансну лінію і зміщує її в бік менших значень магнітного поля, що викликано процесами упорядкування і формуванням невеликих кількостей магнітно-твердої фази $L1_0$ – FePd.

Збільшення тривалості відпалу до 1 години супроводжується подальшим зсувом та розширенням резонансного піку. Такі зміни пов'язані з процесом упорядкування. При відпалі у вакуумі зберігаються феромагнітні властивості плівки, при цьому трохи збільшується значення ефективної намагніченості та зростає ширина лінії резонансного піку(рис. 3.12).

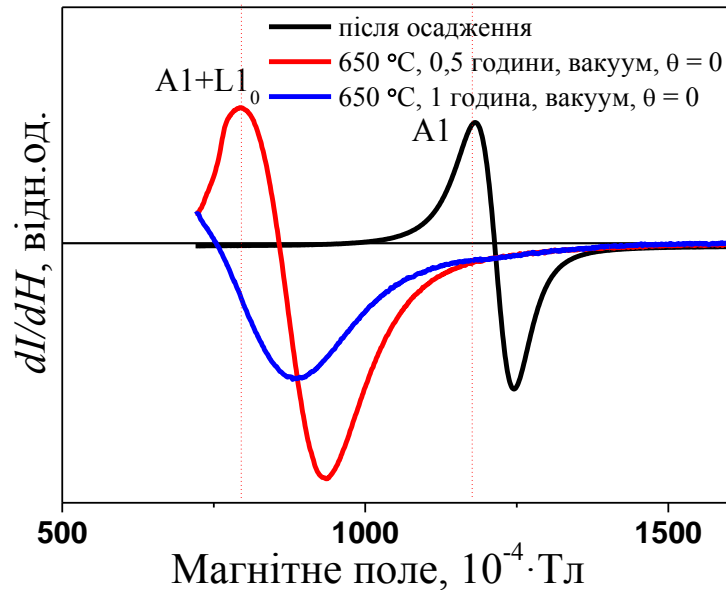


Рисунок 3.12 – ФМР-спектри плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та відпалу у вакуумі за температури $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ тривалістю 0,5 год та 1 год

При відпалі в атмосфері водню у в порівнянні з відпалом у вакуумі спостерігається прискорення процесів упорядкування у плівці $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм). При відпалі за температур $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1 години та $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 30 хвилин відбувається перехід від феромагнітного практично до суперпарамагнітного стану. Дві резонансні лінії присутні на спектрах плівок після відпалів за температури $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ тривалістю 30 хвилин та 1 години. Відпал плівок у водні за температурою $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 0,5 год призводить до зміщення резонансного піку у бік більшого магнітного поля та появою ще одного резонансного піку (при $0,29\text{ Тл}$), який викликаний початком формування впорядкованої фази $\text{L1}_0 - \text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) (рис.3.13). Лінія, яка виникає при прикладеному полі $0,29\text{ Тл}$ належить до феромагнітної фази L1_0 (рис.3.13). Лінія ФМР при цьому зміщується, а «суперпарамагнітна» ($0,21\text{ Тл}$) залишається на місці".

Подальший процес упорядкування зі збільшенням часу відпалу у водні до 1 години призводить до зміщення другого резонансного піка до 2870 Гаус ($0,287\text{ Тл}$), збільшення його інтенсивності, що відповідає збільшенню кількості

упорядкованої фази $L1_0$ -FePd. На резонансному спектрі спостерігається перерозподіл інтенсивності - більша інтенсивність піка 0,29 Тл (упорядкована фаза $L1_0$ -FePd) і незначний пік, який належить неупорядкованій фазі A1-FePd.

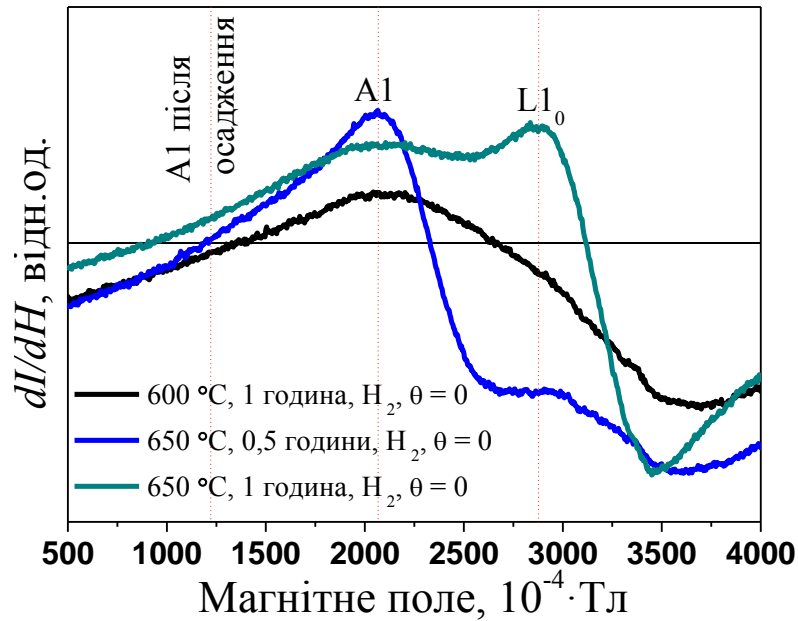


Рисунок 3.13 – ФМР-спектри плівки $Fe_{50}Pd_{50}$ (5 нм) після відпалу у атмосфері водню за температур 600 °C та 650 °C протягом 0,5 год та 1 год

Збільшення часу відпалу у водні до 2 годин та підвищення температури відпалу до 700 °C знову приводить до появи лише одного резонансного піку при 0,21 Тл, що характерно для наявності в плівці неупорядкованої фази A1- FePd (рис.3.14).

Таким чином, при відпалі у водні в інтервалі температур (600-700) °C термічно активовані дифузійні процеси залежать від температури і часу відпалу.

Тому можна стверджувати, що відпал у водні прискорює як процес упорядкування, так і процес розупорядкування.

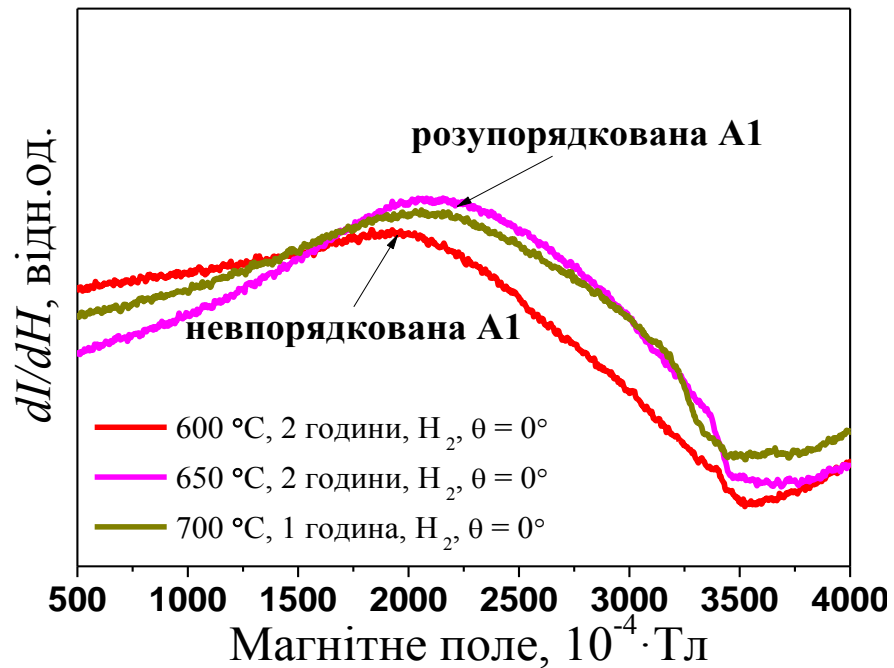


Рисунок 3.14 – ФМР-спектри плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) після осадження та відпалу у вакуумі за температур (600- 700) °С тривалістю 1 год та 2 год

Процеси розупорядкування відображені у зміні спектрів при більшому часу та температури відпалу в водні. Резонансні піки після відпалу 600 °С протягом 2 год, 650 °С протягом 2 год та 700 °С протягом 1 год подібні резонансному піку для неупорядкованого стану після відпалу при 600 °С протягом однієї години (рис. 3.14).

На рисунку 3.15 показано залежності резонансного магнітного поля B від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки. При відпалі у вакуумі за температури 650 °С протягом (0,5 та 1) години для отримання ЕПР треба утричі збільшити прикладене магнітне поле зі збільшенням кута між прикладеним полем та нормаллю до площини плівки до 90° . У той же час при відпалі у водні прикладене поле майже не змінюється.

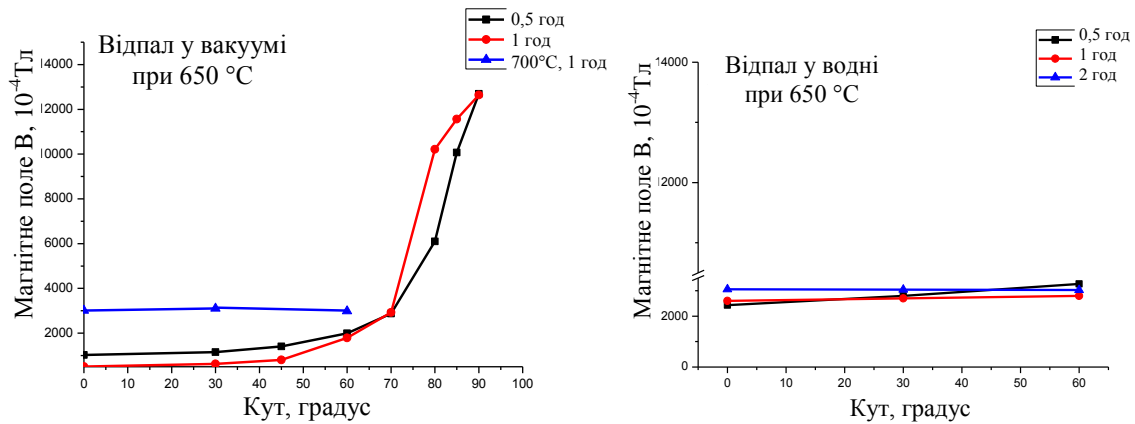


Рисунок 3.15 – Залежність прикладеного магнітного поля B від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки

На рисунку 3.16 показано залежність dH від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки. dH зростає після відпалів. Після відпалу у вакуумі за температури 650 °С протягом 0,5 годин спостерігається максимум на куті 80°. При збільшенні тривалості відпалу до 1 години цей максимум зменшується за величиною та зміщується у бік менших кутів (70°). Положення максимуму відповідає розташуванню вісі важкого намагнічування у плівці FePd.

При відпалі у водні dH незначно збільшується зі збільшенням кута Θ_H

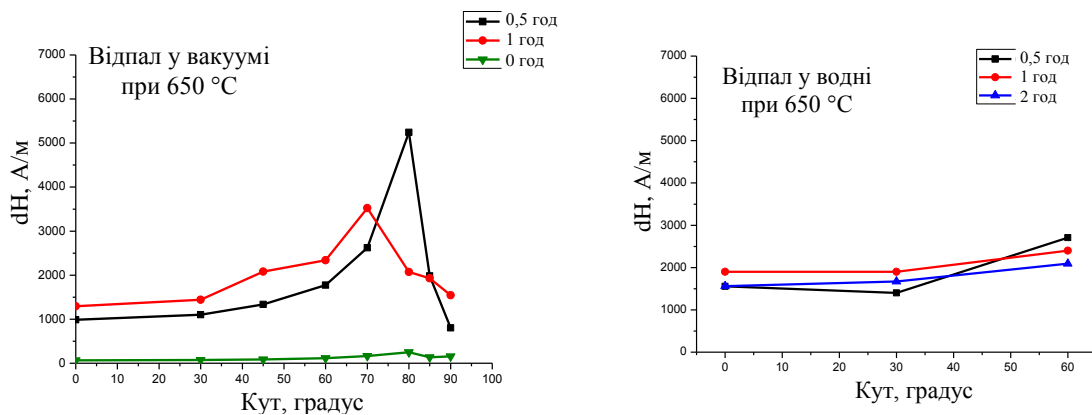


Рисунок 3.16 – Залежність dH від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки

На рисунку 3.17 показано залежність g -фактора від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки. Можна бачити, що після відпалів як у вакуумі, так і у водні g -фактор більше, ніж після осадження. Причому максимальне значення g -фактору після відпалу у вакуумі за температури 650 °С протягом 1 години складає 13,7 на куті $\Theta_H=0^\circ$.

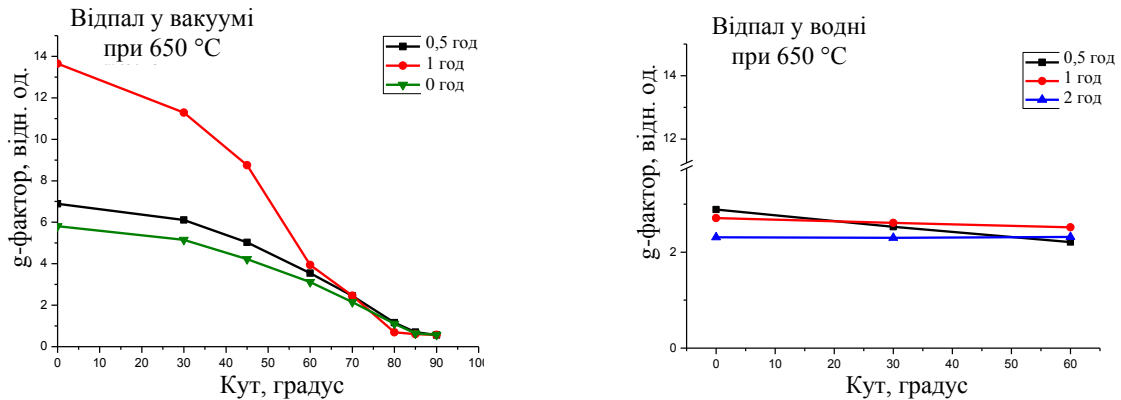


Рисунок 3.17 – Залежність g -фактора від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки

На рисунку 3.18 показано змінення g -фактора (ширини резонансного піку) з тривалістю відпалу. Він стрімко зростає зі збільшенням тривалості відпалу за температури 650 °С до 1 години у вакуумі та плавно спадає при відпалі у водні.

Така відмінність в формуванні фазового складу та структури у плівці $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ нм})$ при відпалах у вакуумі та водні пов'язано з тим, що атоми водню втілюються в кристалічну ґратку неупорядкованої фази A1-FePd , потім впорядкованої $\text{L1}_0\text{-FePd}$ фаз, збільшує їх об'єм. Це призводить до послаблення атомних зв'язків і прискорює як процеси впорядкування, так і розупорядкування. Впливаючи на їх електронну структуру атом водню змінює їх магнітні властивості.

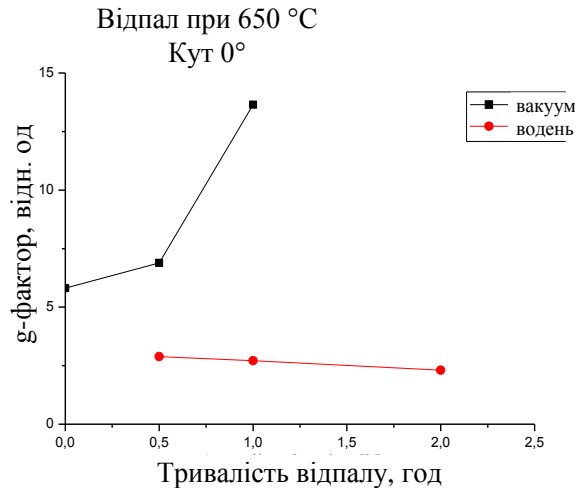


Рисунок 3.18 – Залежність **g**-фактору від часу відпалу у вакуумі та водні за температури 650 °C протягом 1 год

3.4 Висновки до розділу 3

В результаті комплексного дослідження нанорозмірної плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) на підкладках $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$ було встановлено закономірності процесів формування впорядкованої магнітно-твердої фази $\text{L1}_0\text{-FePd}$ та її магнітні властивості при відпалі у вакуумі та в атмосфері водню.

При відпалі у водні в інтервалі температур (600 - 700) °C термічно активовані дифузійні процеси залежать від температури і часу відпалу.

Відпал у атмосфері H_2 прискорює, як процес упорядкування, так і процес розупорядкування.

При відпалі у вакуумі спостерігається незначна зміна морфології поверхні та зменшення середньоквадратичної шорсткості. В той же час відпал у атмосфері водню супроводжується значною зміною морфології а також стрімкою зміною середньоквадратичної шорсткості. Це свідчить про те, що сформувалася велика кількість впорядкованої магнітно-твердої фази $\text{L1}_0\text{-FePd}$ та зростають зерна з

текстурою (111) з розташуванням вісі легкого намагнічування у площині плівки. Зростання шорсткості поверхні зазвичай відбувається при формуванні впорядкованої фази $L1_0$ - FePd .

Встановлено, що залежність dH від кута Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки. dH має максимуми після відпалів у вакуумі за температури 650°C протягом (0,5 та 1) години на кутах 80° та 70° , відповідно. При відпалі у водні кут Θ_H поміж напрямком прикладеного магнітного поля та нормаллю до площини плівки майже не впливає на величину dH .

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність дипломної роботи (ДР)

Неперервний розвиток комп'ютерних технологій потребує розробки нових носіїв інформації, з більшою густиною та стабільністю інформації. Найбільш розповсюдженим методом збереження цифрової інформації є запис її на жорсткі магнітні диски. Диски складаються з немагнітної основи, на яку нанесений магнітний записуючий шар (від 50 нм до 150 нм) на якому відбувається збереження інформації. Магнітний шар складається з феромагнітного матеріалу (оксиди або сплави на основі Co чи Fe). На сьогодні один біт інформації займає досить значну площу: ширина магнітної «доріжки» складає приблизно 0,75 мкм, довжина області, відведеної на один біт, дорівнює (50 – 70) нм, а отже щільність запису інформації становить не більше 100 Гбіт/дюйм². Збільшення щільності запису потребує зменшення розмірів магнітного домену. Проблемою на цьому шляху є те, що при зменшенні розмірів частинок, відбувається їх перехід у суперпарамагнітний стан. Це дестабілізує частинки та не дозволяє використовувати таку структуру в якості носія магнітного запису. Рішенням цієї задачі є розробка магнітних матеріалів з високою енергією магнітно-кристалічної анізотропії. В якості такого матеріалу себе добре зарекомендувала система FePd через її впорядковану структуру $L1_0$.

Під час осадження за кімнатної в плівках FePd формується неупорядкована фаза Al-FePd, яка проявляє магнітно-м'які властивості та не може використовуватись в якості носія магнітного запису. Для отримання впорядкованої фази необхідно проводити наступну термічну обробку (відпал) або осаджувати на нагріту підкладку $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$.

4.2 Мета і завдання ДР

Метою даної роботи було дослідження формування фазового складу та структури в нанорозмірних плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ (5 нм) на підкладках SiO_2 (100 нм)/ Si (001) при відпалах у вакуумі та атмосфері водню.

Завданням даної роботи було:

1. Опрацювання наукових публікацій за обраною тематикою;
2. Розробка методики дослідження;
3. Виготовлення зразків та проведення відпалу;
4. Проведення рентгеноструктурного дослідження;
5. Дослідження магнітних властивостей методом ЕПР;
6. Дослідження морфології поверхні методом АСМ;
7. Встановлення залежності властивостей та структури плівки від температури відпалу;
8. Формування висновків та подання рекомендацій для подальшого дослідження

4.3 Розрахунок планових витрат на проведення ДР

Робота виконувалася на кафедрі Фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Планова кошторисна вартість (собівартість) ДР розраховувалась наступних статтях витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість матеріалів, необхідних для виконання ДР;
- вартість спеціального обладнання для проведення експерименту;

- службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати;

4.3.1 Витрати на оплату праці

Розрахунок заробітної плати науково-виробничого персоналу базується на визначенні трудомісткості робіт окремих виконавців та їхньої денної заробітної плати (враховуючи кількість виконавців, їхню кваліфікацію і завантаженість роботою на різних етапах ДР).

У виконанні нашої ДР приймали участь п'ять виконавців: професор (доктор технічних наук), науковий співробітник, молодший науковий співробітник, провідний інженер та інженер 2 кат. Для КПІ ім. Ігоря Сікорського тарифні ставки сумарної місячної заробітної плати складають:

- Професора – 14326 грн.;
- науковий співробітника – 8466 грн,
- молодшого наукового співробітника – 1817 грн,
- провідного інженера – 5809 грн,
- та інженер 2 кат. – 3934 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, що при п'ятиденному робочому тижні становить 21,2. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає:

- Професора – 675,75 грн.;
- провідного інженера – 274,72 грн.;
- молодшого наукового співробітника – 85, 7 грн.;
- науковий співробітник – 399,34 грн.;

– інженера 2 кат. – 185,56 грн.;

У випадку відсутності відповідних розрахункових методик трудомісткості різних етапів виконання ДР встановлюється на базі експертних оцінок, які дають провідні фахівці. При цьому ДР розглядається як сукупність макроетапів, аналіз кожної окремої операції не проводиться.

Результати експертної оцінки трудомісткості етапів ДР наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання ДР

Макроетапи ДР	Трудомісткість за виконавцями , люд.-дні				
	Провідний інженер	Науковий співробітник	Інженер 2 кат	Професор	М.н.с.
1. Аналіз фахових публікацій за теми	—	15	—	15	—
2. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	-	2	—	—
3. Розробка методики проведення досліджень за темою	2	6	6	2	2
4. Проведення експерименту	—	30	60	—	—
4.1 Виготовлення зразків					
4.2 Проведення термічної обробки					
4.3 Електронографічний аналіз					
4.4 ЕПР					

Продовження таблиці 4.1

Макроетапи ДР	Провідний інженер	Науковий співробітник	Інженер 2 кат	Професор	М.н.с.
4.5 АСМ	—	15	—	15	—
5. Обговорення результатів НДР	6	15	—	20	4
Всього	10	66	68	37	6

Величина фонду заробітної плати виконавців (ФЗП) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з них:

$$\text{ФЗП} = 37 \cdot 676 + 66 \cdot 394 + 68 \cdot 185,56 + 274,73 \cdot 10 + 85,7 \cdot 6 = 67\,238,77 \text{ грн.}$$

4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок складає 22 % від заробітної плати.

$$V_C = 0,22 \cdot 67\,238,77 = 14\,792,52 \text{ грн.}$$

4.3.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень

Для проведення необхідних досліджень було виготовлено 8 зразків, проведення досліджень не потребувало додаткових матеріалів. Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в таблиці 4.2.

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо у розмірі 10 % від вартості матеріалів:

$$2980 \cdot 0,1 = 298 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Плівки FePd(5 нм)	шт.	8	500	2 080
Папір	пачка	1	100	100
Картидж для принтера	шт.	1	800	800
Всього				2 980

Повна сума витрат на матеріали складає: $2\,980 + 298 = 3\,278$ грн.

4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання

При виконанні ДР усі роботи проводилися з використанням наявного обладнання в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4.3.5 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної ДР сторонні організації участі не приймали.

4.3.6 Витрати на службові відрядження

Усі роботи, пов'язані з виконанням ДР за даною темою, проведені в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського. Окремі службові відрядження не планувались.

4.3.7 Інші прямі невраховані витрати по темі

Інші прямі невраховані витрати плануються у розмірі 10 % від врахованих.

$$C_{\text{інші}} = 0,1 \cdot (67\,238,77 + 14\,792,52 + 3\,278) = 8\,530,92 \text{ грн.}$$

4.3.8 Накладні витрати

До накладних витрат відносяться витрати на заробітну плату адміністративно-управлінського, господарчого та допоміжного персоналу (разом з єдиним соціальним внеском), витрати на допоміжні виробництва, витрати на утримання та експлуатацію виробничих площ, наукових приладів та установок, витрати на охорону праці, техніку безпеки та екологію, фінансування підготовки кадрів, воєнізованої охорони і деякі інші.

Норматив відрахувань на накладні витрати для КПІ ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 20 % планової сумарної вартості виконання ДР. Розраховуємо величину накладних витрат наступним чином:

$$H_B = 0,2 \cdot (67\,238,77 + 14\,792,52 + 3\,278 + 8\,530,92) = 18\,778,04 \text{ грн.}$$

4.3.9 Визначення планової коштовної вартості теми

Планова кошторисна вартість ДР визначається як сума витрат за окремими статтями калькуляції. Результати визначення вартості наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція коштовної вартості ДР

Найменування калькуляційних статей	Позначення	Сума	
		грн.	%
1. Фонд заробітної плати	ФЗП	67 238,77	59,7
2. Єдиний соціальний внесок	В _С	14 792,52	13,13
3. Матеріали необхідні для виконання теми	С _М	3 278	2,91
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	С _{об}	—	—
5. Робота і послуги сторонніх організацій	С _{стор}	—	—
6. Витрати службові відрядження	С _{від}	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	С _{інш}	8 530,92	7,57
8. Накладні витрати	Н _В	18 778,04	16,67
Всього		112 618,25	100

Згідно з таблицею 4.3 загальна планова кошторисна вартість ДР складає:
 $V_{\text{ДР}} = 112\,618,25$ грн.

4.4 Науково-технічна ефективність

Дослідження, що проводяться в даній роботі, мають пошуковий та теоретичний характер. Відповідно з цим прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту надзвичайно складний, оскільки відсутні повні дані відносно сфери використання результатів роботи, а також вихідні дані для розрахунку одночасних та поточних витрат. У такому випадку слід використовувати бальну систему оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки;
- можливість використання результатів;
- теоретичне значення та рівень новизни дослідження;
- складність виконання теми.

Частку сумарного річного економічного ефекту, що утвориться за кожною з перелічених шкал, позначають умовно відповідним номеру шкали коефіцієнтом (K_1 , K_2 , K_3 , K_4). Наведемо докладніше систему оцінки за кожною шкалою. Першою розглянемо шкалу важливості розробки.

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями – 5 балів.
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- внаслідок виконання ДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне – 6 балів;
- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів;

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень - 1 бал;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень - 3 бали;
- роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень - 5 балів;

- робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень - 7 балів;

- робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 гривень - 9 балів.

Бальна оцінка економічної ефективності даної науково-дослідної роботи згідно табл. 4.4 становить: $B = 3 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5 = 450$.

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності ДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів	K_2	результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни	K_3	під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про	3
4. Складність проведення дослідження	K_4	роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний річний економічний ефект науково-дослідної роботи визначається:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot B - E_{\text{Н}} \cdot V_{\text{ДР}} \quad (4.1)$$

- де 500 - умовна вартість одного балу, грн.;

$E_{\text{Н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_{\text{Н}} = 0,1 \div 0,5$, для нашого розрахунку обираємо $E_{\text{Н}} = 0,2$);

$V_{\text{ДР}}$ – витрати на виконання ДР (планова річна кошторисна вартість виконання ДР, для нашого розрахунку $V_{\text{НДР}} = 112\,618,25$ грн.).

Таким чином, умовний економічний ефект становить:

$$E_{\text{ДР}} = 500 \cdot 360 - 0,2 \cdot 112\,618,25 = 157\,476,35 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності :

$$K_{\text{ДР}} = 157\,476,35 / 112\,618,25 = 1,46.$$

Отримана розрахункова величина коефіцієнта економічної ефективності НДР ($K_{\text{ДР}} = 1,46$) свідчить про доцільність виконання даної роботи.

4.5 Висновки до розділу 4

Розрахували планову кошторисну вартість (собівартість) ДР, яка склала 112 618,25 грн.

Провели економічний аналіз доцільності даної науково-дослідницької роботи та виявили, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Вступ

Метою цього розділу є аналіз шкідливих та небезпечних факторів, при яких виникає небезпека ураження організму, тобто умов, що можуть привести до захворювання та травмування в процесі отримання та дослідження структурних і магнітних властивостей у нанорозмірних плівках $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та безпеку у надзвичайних ситуаціях. Тонкоплівкові зразки отримані магнетронним методом осадження з використанням мішеней з металів Fe та Pd високої чистоти (99,99 %) у пристрої В55. Відпал у вакуумі проводився на установці ВУП-5М.

Аналізуючи умови праці при виконанні цієї ДР, потрібно розглянути такі чинники: мікроклімат; склад повітря робочої зони; шум; вібрації; електрична та пожежна безпека.

5.2 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні ДР

Науково-дослідницька робота виконувалась на кафедрі фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського в лабораторії електронографії №403, корпусу №19. Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів представлено на рис. 5.1. Було проведено вимірювання приміщення лабораторії та вікон, які наведені:

- розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 8 м, висота – 3,8 м.
- розміри вікон: ширина – 2,7 м, висота – 2,5 м.

Лабораторія, в якій працює п'ять чоловік має площу – 48 м^2 , об'єм – $182,4 \text{ м}^3$. Площа, яка приходить на одну людину – $9,6 \text{ м}^2$, об'єм – $36,48 \text{ м}^3$.

Приміщення, в якому виконувалася НДР, має наступні установки:

1 – електронограф ЕМР – 100; 2 – електронний мікроскоп ЕМВ – 100Л;
3 – вакуумний універсальний пост ВУП–5М; 4 – вакуумний універсальний пост ВУП–5М; 5 – шафа для інструментів; 6 – книжкова шафа; 7 – стіл письмовий;
8 – комп'ютер; 9 – комп'ютер.

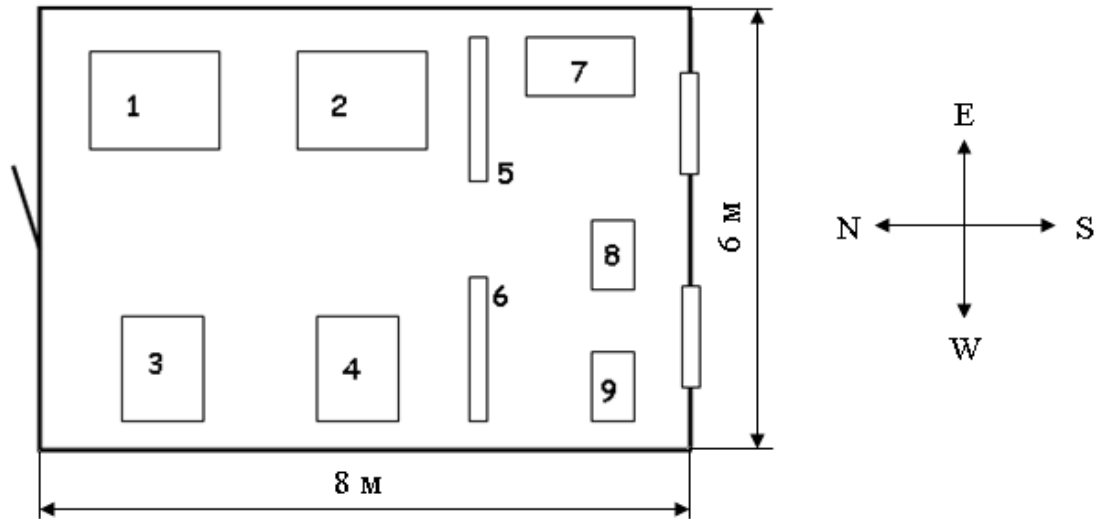


Рисунок 5.1 – Схема лабораторії в якій виконувалася НДР

Таким чином, площа та об'єм лабораторії, згідно з ДСанПІН 3.32-007-98, де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м² площі та 20 м³ об'єму, відповідають нормам [42].

5.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення

Дуже важливою складовою для нормальної та комфортної працездатності людини – чисте повітря з оптимальною температурою, необхідною вологістю та швидкістю повітря.

Для забезпечення оптимального мікроклімату «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальні і допустимі температури, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт [41 – 45].

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 проведене дослідження відповідає категорії I б. Дана категорія передбачає легкі фізичні роботи до 150 ккал/год, які виконуються сидячи або стоячи та можуть супроводжуватись незначною фізичною напругою, а також роботи пов'язані з ходьбою. Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії № 403-19 показали, що при водяному опаленні в холодному періоді року температура становить приблизно 21 °С, фактична швидкість руху повітря – 0,1 м/с та відносна вологість – 70 %. В теплий період року при природньому повітря-обміну фактична температура становить 22 °С, швидкість руху повітря – 0,2 м/с та відносна вологість – 55 % (допустима – 60 % при 27 °С).

На основі вище написаного можна зробити висновок, що мікроклімат в лабораторії відповідає вимогам санітарних норм.

5.2.2 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрації

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають в результаті ковалентного руху частинок у пружному середовищі. Науково-дослідницька робота виконувалась на установці ВУП–5М, під час роботи якої спостерігається деякий шум.

Під дією шуму відбувається зниження слухової чутливості, а отже й суттєве зниження продуктивності на робочому місці. Дуже ефективний спосіб боротьби з шумом – це зниження його в джерелі створення:

- заміна шумних технологічних процесів або обладнання малошумними;
- звуковбирання та звукоізоляція;
- екранування;
- оснащення шумних машин засобами дистанційного та автоматичного управління;
- застосування засобів індивідуального захисту.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСТУ 2867-94. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99.

Вібрація – це механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація є видом механічного впливу, який має негативні наслідки для організму [46].

До джерел технологічної вібрації відносяться:

- верстати та метало-деревообробне;
- електричні машини;
- стаціонарні електричні установки;
- насосні агрегати та вентилятори та ін..

Вібрація має механічний вплив на організм людини та може бути причиною порушення його функціонування. Джерелом вібрацій під час виконання НДР є вакуумний пост ВУП-5М.

Для зменшення впливу вібрацій на працівника та інше обладнання використовують методи віброгасіння. На вібруючі пристрої встановлюється динамічне навантаження, а самі пристрої розташовуються на окремий

віброізолюваний фундамет. Джерела коливань ізолювані від опорних конструкцій гумовими прокладками, пружинами або іншими віброізоляторами.

5.2.3 Розрахунок і аналіз освітленості приміщення

У залежності від джерела світла освітлення може бути:

- природним (розсіяні на небосхилі або прямі сонячні промені);
- штучним (освітлення електричними пристроями);
- суміщеним (недостатня кількість природного освітлення компенсується штучним).

Природне освітлення поділяється на: бокове (одно або двобічне), що здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах приміщення; верхнє, що здійснюється через отвори в стелях та дахах; комбіноване – поєднання бокового та верхнього освітлення.

Штучне освітлення поділяється на загальне, місцеве та комбіноване. Загальне освітлення реалізується встановленням світильників у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над рівнем підлоги). Місцеве освітлення створюється світильниками, світловий потік яких сконцентровано безпосередньо на робочу поверхню. Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Використовувати лише місцеве освітлення у виробничих приміщеннях заборонено [48].

У приміщенні лабораторії № 403 реалізована схема суміщеного освітлення. В світлий час доби приміщення освітлюється природнім освітленням з вікон. При цьому, нестача, за умовами зорової роботи, природного освітлення може бути компенсована штучним, яке задовольняє норми ДБН В.2.5-28 2006 [39,45]. Загального освітлення забезпечується люмінесцентними лампами ЛБ-40 (24

одиниці), що розташовані на стелі приміщення, для місцевого – лампи розжарювання.

Нестача, надмірність або неоднорідність освітлення в полі зору втомлює очі, що є причиною зниження продуктивності праці. Це може бути джерелом потенційної небезпеки виконання помилкових дій та нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може викликати розлад гостроти зору та головний біль, відблиски від поверхонь можуть спричинити тимчасове засліплення [48].

5.2.4 Електробезпека

Відповідно до діючих правил побудови електричних пристроїв ПУЕ - 2017 приміщення лабораторії за безпекою електротравм відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки [43]. Це сухі приміщення з оптимальною температурою повітря та струмонепровідною підлогою. Електричні пристрої, використані для виконання даної науково-дослідної роботи живляться напругою 220 В (вакуумний універсальний пост ВУП-5М) та 380 В (електронограф ЕМР – 100) з частотою 50 Гц.

Причинами ураження електричним струмом є :

- пошкодження ізоляції (наприклад, розплавлений метал) та, як наслідок, доступність до струмоведучих частин обладнання;
- поява напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки;
- невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неуважність при роботі.

Дія електричного струму на організм людини може мати небезпечні для здоров'я людини наслідки та призвести до смерті. При проходженні через тіло людини струм здійснює:

- термічний (опіки, пошкодження судин) вплив;
- електролітичний (розкладення органічних сполук) вплив;
- біологічний вплив.

Напруга доторкання і токи, які протікають через тіло людини при нормальному (неаварійному) режимі електроустановки, для струму з частотою 50 Гц не повинні перевищувати значення: $U_{\text{дот}} = 2,0 \text{ В}$ та $I = 0,3 \text{ мА}$.

У лабораторії захисне заземлення електроустаткування і приладів проведено правильно. Причиною можливого ураження електричним струмом можуть стати пробіи на корпусі установки або пошкодження кабелів ізоляції.

5.2.5 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.07.005-86 лабораторія за пожежною безпекою належить до категорії В, тому що в ній знаходяться тверді та важкогорючі матеріали та вона не належить до категорій А,Б [47,49,50].

У випадку пожежі у лабораторії може горіти:

- електроустановки та їхня проводка;
- паркет та штори;
- шафи та паперові документи, що знаходяться в них.

Виникнення пожеж у лабораторії можливо за наступними причинами:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електроустаткування;
- необережне звертання з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- неправильне користування устаткуванням.

Наприклад, якщо пожежа розпочнеться, то в лабораторії є водопровід, вогнегасник вуглекислотноброметиловий ОУБ-3, а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б, пожежні крани. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (оповісник КИ-1). Також в корпусі, на кожному поверсі є план евакуації (рис.5.2).

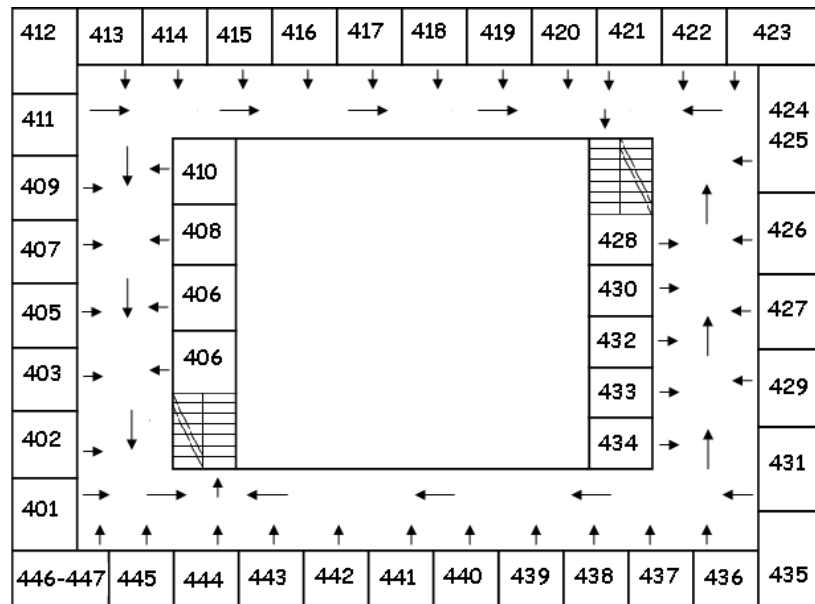


Рисунок 5.2 – План евакуації під час пожежі

5.3 Висновок до розділу 5

Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, а саме: мікроклімату, складу повітря робочої зони, шуму, вібрації, електричної та пожежної безпеки. Все зафіксоване знаходиться в межах допустимих норм.

Встановлено, що при дотриманні встановлених санітарних норм в технологічних приміщеннях проведення ДР не порушує правил та заходів щодо охорони праці.

ВИСНОВКИ

1. Тонкоплівкові матеріали на основі еквіатомного сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ з впорядкованою структурою $L1_0$ є перспективним матеріалом для використання в якості середовища надщільного магнітного запису наступного покоління, завдяки їх високим значенням магнітної анізотропії, коерцитивної сили та намагніченості насичення.

2. Встановлено, що при відпалі плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ нм})$ в інтервалі температур (600 - 700°C) як у вакуумі так і у водні термічно активовані дифузійні процеси упорядкування і фазоутворення залежать від температури і часу відпалу. Найбільш інтенсивно впорядкована фаза $L1_0\text{-FePd}$ формується за температури 650 °C.

3. Показано, що відпал у H_2 за температури 650 °C протягом 1 год прискорює формування впорядкованої фази $L1_0\text{-FePd}$ у плівках, порівняно з відпалом у вакуумі майже у 10 разів. Це пояснюється тим, що при відпалі атоми водню займають октаедричні та тетраедричні пори у $A1\text{-FePd}$ фазі, що зумовлює збільшення об'єму елементарної комірки. Це послаблює взаємодію між атомами Fe-Pd та сприяє взаємодифузії і прискоренню формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0\text{-FePd}$. Подальше збільшення часу термообробки у водні до 2 год не сприяє подальшому упорядкуванню та веде до перетворення впорядкованої фази $L1_0$ у неупорядковану $A1\text{-FePd}$. Збільшення тривалості відпалу у вакуумі до 20 год призводить до збільшення кількості впорядкованої фази.

4. Методом ЕПР підтверджено формування магнітно-твердої фази при відпалах у вакуумі та водні за температури 650 °C протягом 1 год. Атоми водню впливають на електронну структуру плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}(5 \text{ нм})$.

5. Був проведений аналіз доцільності даної дипломної роботи який виявив, що дане дослідження є доцільним.

6. Встановлено, що умови мікроклімату, рівень шуму, вібрацій, освітлення а також організація робочого місця в лабораторії відповідають вимогам діючих санітарних норм.

CONCLUSIONS

1. Thin-film materials based on $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ equiatomic alloy with ordered L_{10} structure are a promising material for use as a medium-generation ultra-dense magnetic recording medium, due to their high values of magnetic anisotropy, coercive force and saturation magnetization.

2 It is established that during annealing of the $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$ film (5 nm) in the temperature range (600 – 700) °C both in vacuum and in water thermally activated diffusion processes of ordering and phase formation depend on the temperature and annealing time. The most intensely ordered L_{10} -FePd phase is formed at 650 °C.

3. It is shown that annealing in H_2 at 650 °C for 1 h accelerates the formation of an ordered L_{10} -FePd phase in films, compared to annealing in vacuum almost 10 times. This is explained by the fact that during annealing hydrogen atoms occupy octahedral and tetrahedral pores in the A1-FePd phase, which causes an increase in the volume of the unit cell. This weakens the interaction between Fe-Pd atoms and promotes mutual diffusion and accelerates the formation of an ordered hard magnetic L_{10} - FePd phase. A further increase in the heat treatment time in hydrogen to 2 h does not promote further ordering and leads to the conversion of the ordered L_{10} phase into the disordered A1-FePd. Increasing the duration of annealing in vacuum to 20 h leads to an increase in the amount of ordered phase.

4. The EPR method confirmed the formation of the hard magnetic phase during annealing in vacuum and hydrogen at a temperature of 650 °C for 1 hour. Hydrogen atoms influence on the electronic structure of the film.

5. An analysis of the feasibility of this research work which found that this study is appropriate.

6. It is established that the conditions of the microclimate, noise, vibration and lighting, as well as the organization of the workplace in the laboratory meet the requirements of current sanitary norms.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перспективні матеріали [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/2851341/page:26/>.
2. Formation of the Ordered L₁₀-FePt Phase in Fe₅₀Pt₅₀/Au/Fe₅₀Pt₅₀ Films at Annealing in Hydrogen / M. Verbytska, M. Shamis, V. Makushko and etc. // Metallofiz. Novqishie Tekhnol..– 2018.– Vol 40(8).– P. 1069-1079.
3. Суперпарамагнетизм [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Суперпарамагнетизм>.
4. Железо [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Железо>.
5. Железо модификации [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: <https://chem21.info/info/132774/>.
6. Палладий [Режим доступу] – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Палладий>
7. Магниторезистивные свойства многослойных наноразмерных пленочных систем / О. В Сынашенко, Е. П. Ткач, И. П. Бурык и др. // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. – 2009. – № 6. – С. 169-174.
8. ДСТУ 2813-94 Носії магнітного запису. Терміни та визначення.
9. Магнітний домен [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнітний_домен
10. Технологии записи на магнитные диски // Пятифан – Режим доступу: <http://5fan.ru> – Дата доступу: 29.10.19.
11. Бех І. Фізичні основи комп'ютерної електроніки/ І.І. Бех, С.М. Левицький // Київ: Карбон.– 2010. – С.203-210.

- 12.Хлопов Б.В. Особенности магнитной записи в системах связи. / Б.В. Хлопов// Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2014. – №3. – том 8.– С. 6 – 10.
- 13.Перспективы развития устройств хранения информации на магнитных носителях / А.А. Соколовский, А.Ю. Митягин, Б.В. Хлопов, А.С. Кузьминых // 2008. — 499с.
- 14.Новые технологии жестких дисков – Режим доступа: <http://ichip.ru/novie-tehnologii-jestkih-diskov.html> – Дата доступа: 28.05.2020.
- 15.Подгорная Е.А. Современные методы магнитной записи сигналов: Учебное пособие. / Е.А. Подгорная –СПб.: изд. СПбГУКиТ, 2010. 64с., 19 илл.
- 16.Lim B. Crystallographic orientation control in L10 FePt films on CrRu underlayer / B.C. Lim, J.S. Chen, J.P. Wang // Surface & Coatings Technology. – 2005. – 198. – P.296-299.
- 17.Future storage technologies / C. Esener, H. Kryder, D. William and etc. // The Future of Data Storage Technologies. – 4501. – 1999. – P. 21210-2699.
- 18.Магнітний домен [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гігантський_магнетоопі
- 19.Третьяк О. Фізичні основи спінової електроніки. // О.В. Третьяк, В.А. Львов, О.В. Барабанов. — К. : Київський університет, 2002.
- 20.Шаповалов В.И. Влияние водорода та структуру и свойства железоуглеродистых сплавов / В.И. Шаповалов // М., Металлургия, 1982, 232 с.
- 21.Фазовая диаграмма системы Fe-H [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Fe-H.php>

22. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1997. — 1024 с.
23. Моисеенко Е. Т Структурные фазовые превращения и атомное упорядочение при твердофазных реакциях в тонкопленочных системах Cu/Au и Pd/Fe: дис. ... канд. физ.- мат. Наук : 01.04.07 – физика конденсированного состояния / Моисеенко Евгений Тимофеевич и инст. физ. им. Л. В. Киренского. – Красноярск, 2014. – 128 с.
24. Formation of L_{10} -type ordered FePd phase in multilayers composed of Fe and Pd / Y. Endo, Y. Yamanaka, Y. Kawamura, M. Yamamoto // Japanese Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 44. – No. 5A. – P. 3009-3014.
25. Kovacs A. High-resolution transmission electron microscopy analysis of L_{10} ordering process in Fe/Pd thin layers / A. Kovacs, K. Sato, Y. Hirotsu // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 102. – No. 12. – P. 123512-1-123512-4.
26. Твердофазный синтез эпитаксиальных L_{10} -FePd(100) тонких пленок : структурные превращения и магнитная анизотропия / В. Г. Мягков, В. С. Жигалов, Л. Е. Быкова, Л. А. Соловьев, Г. Н. Бондаренко // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т. 91. – Вып. 9. – С. 527-531.
27. Solid-state synthesis and magnetic properties of epitaxial FePd₃(001) films / V. G. Myagkov, V. S. Zhigalov, B. A. Belyaev, L. E. Bykova, L. A. Solovyov, G. N. Bondarenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. – Vol. 324. – No. 8. – P. 1571-1574.
28. Поведение металлов в водороде [Электронный доступ] – Режим доступа до ресурсу: <https://chem21.info/page/115249241088088059138018116128012003100004078013/>

29. Pogrebjnak A. Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019) / A. D. Pogrebjnak, O. Bondar – Springer. –2020. – P. 372-376.
30. The effect of interstitial hydrogen on the electronic structure of Fe–Pd alloys / A. Estella, V. Paula, J. Castellani, J. Alfredo // Journal of physics and chemistry of solids. –2004. –Vol 65(11). –P. 1799–1807.
31. Absorption of hydrogen by thin films / V. Vlasov, G. Guglya, O. Marchenko, S. Melnikova // Usp. Fiz. Met. –2015. –Vol 16(2). –P. 85–117.
32. Pundt A. Hydrogen in metals / A. Pundt, R. Kirchheim // Annual review of materials research. –2006. –Vol 36. –P. 555-608.
33. Данилин Б. Исследование магнетронных систем ионного распыления материалов. / Б.С. Данилин, В.К. Неволин, В.К. Сырчин – Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1977, вып. 3 (69), – с. 37 – 44.
34. Минайчев В.Е. Нанесение пленок в вакууме / В.Е. Минайчев. – М: Высшая школа. 1989. – 211с.
35. Кудинов В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. М: Металлургия, 1992. – 432с.
36. Шишаков Н.А. Основные понятия структурного анализа / Шишаков Н. АН СССР, Ин-т физ. химии. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – С. 101-103.
37. Горячко А.М. Основи скануючої зондової мікроскопії та спектроскопії (Частина 2): Навчальний посібник / за ред. С.П. Кулика та О.В. Прокопенка. – К.: Радіофізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2012. – 170 с.
38. Методы электронной микроскопии [Электронный доступ] – Режим доступа до ресурсу: https://studwood.ru/1197382/geografiya/metody_elektronnoy_mikroskopii

- 39.Електронний парамагнітний резонанс [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електронний_парамагнітний_резонанс
- 40.Зацепин А. Физика твердого тела. Лабораторный практикум / А.Ф. Зацепин, Е.А. Бунтов. Екатеринбург ФГАОУ ВПО УрФУ, 2012 – 123 с.
- 41.Охорона праці [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Охорона_праці
- 42.Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В. В. Зацарний та ін. // За ред. О.Г. Левченка. – К.: Основа, 2019. – 472 с
- 43.Желібо Є.П Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний // За ред. Є.П. Желібо . – Київ: «Каравела»; 2001. – 320 с.
- 44.Закон України «Про охорону праці» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст.668
- 45.ДСан ПіН 3.32 -007 – 98 – Будівельні норми і правила
- 46.Вибрация и защита от ней [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу <https://www.diagram.com.ua/info/ohrana/ohrana-truda187.shtml>.
- 47.НАПБ Б.07.005-86 – Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности
- 48.ДБН В.2.5.28-2006. Природне та штучне освітлення.
- 49.ДБН В2.5-13-98. Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд
- 50.Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с